

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності _____ *153 «Мікро- та наносистемна техніка»*
(код і назва)

на тему: «Електрофізичні властивості межі поділу напівпровідникових структур на основі нанокремнію»

Виконав (-ла): студент (-ка) 6 курсу, групи ДП-61м
(шифр групи)

Задорожний Олександр Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н. Коваль В.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.т.н. Орлов А.Т.

Консультант з інформаційних питань ст. викл., к.т.н. Діденко Ю.В.

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з
праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2018 року

РЕФЕРАТ

Роботу викладено на 94 сторінках, вона містить 5 розділів, 38 ілюстрацій, 26 таблиць і 34 джерела в переліку посилань.

Об'єктом дослідження є напівпровідникові структури на основі нанокремнію.

Предмет роботи – оцінка якості межі поділу напівпровідникових структур на основі нанокремнію.

Мета роботи – дослідити електрофізичні властивості межі поділу напівпровідникових структур на основі нанокремнію.

В першому розділі подано огляд літератури, в якому розглядається аналіз теоретичних основ роботи напівпровідникових структур.

В другому розділі роботи проводився огляд методів аналізу та оцінки якості межі поділу напівпровідникових структур.

В третьому розділі наводяться результати дослідження електрофізичних властивостей межі поділу напівпровідникових структур на основі нанокремнію.

В четвертому розділі наводяться результати дослідження впливу якості межі поділу на характеристики гетероструктурних фотоварікапів на основі нанокремнію.

В п'ятому розділі описана розробка старт-ап проекту на основі виконаної дисертаційної роботи.

ГЕТЕРОСТРУКТУРА, НАНОКРЕМНІЙ, ФОТОВАРІКАП,
НАПІВПРОВІДНИКИ.

ABSTRACT

The work presented on 94 pages consists of 5 parts, 38 figures, 26 tables and 34 sources in the list of references.

The object of study is semiconductor structures based on nanosilicon.

The subject of work - evaluation of the quality of the interfaces in semiconductor structures, based on nanosilicon.

The purpose of the work is to research electro-physical properties of the interfaces in semiconductor structures based on nanosilicon.

The first section provides an overview of the literature, which addresses the analysis theoretical basics of operation of semiconductor structures.

In the second chapter of work, overview of analysis methods and evaluation of the quality of interfaces in semiconductor structures were conducted.

In the third section, the results of researches of electro-physical properties of the interfaces in semiconductor structures based on nanosilicon are presented.

In the fourth section, the results of impact of the quality of interfaces in semiconductor structures, based on nanosilicon are presented.

In the fifth section the startup project development followed from the carried out thesis is described.

HETEROSTRUCTURE, NANOSILICON, PHOTOVARACTOR,
SEMICONDUCTORS.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	6
ВСТУП	8
1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ...	10
1.1. Структура метал-напівпровідник	10
1.2. Структура напівпровідник-напівпровідник	18
1.3. Структура метал-діелектрик-напівпровідник	24
2. МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА ОЦІНКИ ЯКОСТІ МЕЖІ ПОДІЛУ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР	35
2.1. Структурні дефекти межі поділу напівпровідникових структур	35
2.2. Основні методи дослідження електрофізичних властивостей межі поділу напівпровідникових структур	39
3. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕЖІ ПОДІЛУ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВІ НАНОКРЕМНІЮ	46
3.1. Технологія синтезу, структура та хімічний склад нанокремнію	46
3.2. Аналіз вольт-фарадних характеристик гетероструктур на основі нанокремнію	50
3.3. Визначення електрофізичних параметрів межі поділу гетероструктурних варікапів на основі нанокремнію	59
4. ВПЛИВ ЯКОСТІ МЕЖІ ПОДІЛУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОСТРУКТУРНИХ ФОТОВАРІКАПІВ НА ОСНОВІ НАНОКРЕМНІЮ ...	67
4.1. Аналіз світлових вольт-фарадних характеристик гетероструктур на основі нанокремнію	67
4.2. Визначення фоточутливих параметрів гетероструктурних фотоварікапів на основі нанокремнію	73
5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ	77
ВИСНОВКИ	90
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	91

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АСМ – атомно-силова мікроскопія;
ВЧ – високочастотні;
ВФХ – вольт-фарадна характеристика;
ДС – джерело світла;
КЕФ – кремній, легований фосфором;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
МДН – метал-діелектрик-напівпровідник;
МОН – метал-оксид-напівпровідник;
НВЧ – надвисока частота;
НЧ – низькочастотні;
ОПЗ – область просторового заряду;
ПБД – потенціальний бар'єр дірок;
ПБЕ – потенціальний бар'єр електронів;
СЕМ – скануюча електронна мікроскопія;
 A_m – робота виходу електронів з металу;
 A_n – робота виходу електронів з напівпровідника;
С – ємність;
 C_d – ємність діелектрика;
 C_0 – питома ємність;
 C_{FB} – ємність плоских зон;
 C_D – ємність Дебая;
 C_S – приповерхнева ємність напівпровідника;
 C_k – змінна ємність вимірювального контуру;
 C_{bl} – блокуюча ємність;
 C_{bar} – бар'єрна ємність;
 d_{OPZ} – товщина збідненого шару;
d – товщина діелектрика;

f – частота тестового сигналу;
 K_T – коефіцієнт перекриття по ємності в темновому режимі;
 $K_{св}$ – коефіцієнт перекриття по ємності в світловому режимі;
 L_K – індуктивність вимірювального контуру;
 L_d – дебавська довжина;
 N – концентрація носіїв,
 N_d – концентрація дірок;
 N_{s0} – ефективна густина початкового заряду;
 N_{ss} – густина поверхневого заряду;
 N_{Σ} – густина сумарного поверхневого заряду;
 $nc\text{-SiO}_x$ – високоомний нанокристалічний кремній;
 $nc\text{-Si}$ – низькоомний нанокристалічний кремній;
 Q_{ss} – повний заряд поверхневих станів;
 Q_{Σ} – сумарний заряд межі плівка – підкладка;
 q – елементарний заряд електрона;
 $R_{об}$ – обмежувальний резистор;
 S – площа контакту;
 T_{oc} – температура осадження;
 t_{oc} – час осадження;
 U_{FB} – напруга плоских зон;
 U_3 – напруга затвора;
 Y_L – поверхневий потенціал початку сильної інверсії;
 $\phi_{кон}$ – контактна різниця потенціалів;
 ϕ_T – температурний потенціал;
 ψ_B – різниця положення рівня Фермі у власному та заданому напівпровіднику;
 χ – спорідненість напівпровідника до електрону;
 ϵ – діелектрична проникність;
 ϵ_0 – діелектрична стала;
 ϵ_d – діелектрична проникність діелектрика;
 λ – довжина світлової хвилі.

ВСТУП

Нанокристалічний кремній являє собою аморфну плівку, в яку впроваджено нанокристаліти, розміром 1-100 нм. Наявність цих нанозерен підвищує величину забороненої зони матеріалу, а також покращує його електричні і оптичні характеристики. Розрізняють два типи нанокремнію: високоомний (nc-SiO_x) та низькоомний (nc-Si). Однією з переваг нанокремнію є його стабільність до дії інтенсивної засвітки, тобто усувається один з найважливіших недоліків аморфного кремнію – ефект Стеблера-Вронського. Тому, на сьогоднішній день нанокремній використовується для синтезу різних напівпровідникових плівкових структур (фотоприймачів, сонячних елементів – низькоомний, фотоварікапів – високоомний) замість аморфного [1].

Незалежно від області використання, важливою є оцінка якості межі поділу плівка-підкладка. В даній роботі для дослідження було обрано фотоварікап, що містить в якості високоомної плівки нанокристалічний кремній (nc-SiO_x), нанесену на підкладку монокристалічного кремнію. На сьогоднішній день фотоварікапи використовуються в якості сенсорів, елементів пам'яті, електронних перемикачів у різних галузях електроніки: біомедицині, сенсориці, волоконно-оптичних системах передачі інформації, оптоелектроніці, тощо. МДН фотоварікапи характеризуються високими значеннями добротності, вхідного опору, фоточутливості, коефіцієнта перекриття по ємності і працюють при будь-якій полярності напруги. Найважливішою структурною частиною фотоварікапу є його діелектрична плівка. В якості високоомної плівки використовуються: оксид кремнію, оксид лютецію, оксид церію, оксид лютецію, оксид самарію, тощо. Традиційним матеріалом для виготовлення МДН фотоварікапів є оксид кремнію, однак обмеженнями його використання у складі фотоварікапів є низька величина відносної діелектричної проникності, а також високотемпературний процес його синтезу. Даних обмежень не мають оксиди рідкоземельних елементів, але в той же час вони характеризуються досить високою вартістю вихідних матеріалів та їх радіоактивністю, а також необхідністю дотримуватися надвисокої чистоти

технологічного процесу для синтезу без сторонніх домішок, так як дані хімічні елементи є гарними гетерами вуглецю, кисню, сірки, тощо. Тому і було обрано в якості високоомної плівки нанокремній, що володіє наступними перевагами: висока поширеність у природі, відносно низька вартість виготовлення, відсутність радіоактивних і токсичних елементів у технологічному процесі а також сумісність з інтегральною технологією виготовлення мікросхем.

Метою даної роботи було дослідити електрофізичні властивості межі поділу структур $\text{nc-SiO}_x/\text{c-Si}$ і встановити їх вплив на фоточутливість фотоварікапів на основі нанокремнію. Для цього необхідно було вирішити наступні завдання:

- 1) Здійснити літературний огляд різних видів напівпровідникових структур та методів оцінки якості межі поділу в них.
- 2) Визначити електрофізичні властивості межі поділу структур $\text{nc-SiO}_x/\text{c-Si}$ в залежності від технологічних режимів синтезу плівок нанокремнію.
- 3) Встановити вплив електрофізичних властивостей межі поділу структур $\text{nc-SiO}_x/\text{c-Si}$ на фоточутливі характеристики фотоварікапів на їх основі.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР

1.1 Структура метал-напівпровідник

При ідеальному контакті метала з напівпровідником (тобто при відсутності будь-яких проміжних шарів, що відрізняються хімічним складом і без врахування поверхневих станів на межі поділу) відбувається дифузія електронів переважно з матеріалу з меншою роботою виходу електронів в матеріал з більшою роботою виходу. Робота виходу електронів – це енергія, яка потрібна для переводу електрона з рівня Фермі на вершину верхньої вільної зони (без видалення електрона в вакуум на безкінечну відстань від поверхні напівпровідника).

В результаті дифузії електронів і перерозподілу зарядів порушується електрична нейтральність прилеглих до межі поділу областей, виникає контактне електричне поле і контактна різниця потенціалів

$$\varphi_{\text{кон}} = (A_{\text{м}} - A_{\text{н}}) / q \quad (1.1)$$

де $A_{\text{м}}$ і $A_{\text{н}}$ - відповідно робота виходу електронів з металу і напівпровідника.

Перехідний шар, у якому існує контактне (або дифузійне) електричне поле і який утворений в результаті контакту між металом і напівпровідником називається переходом Шотткі, по імені німецького вченого В. Шотткі, який першим отримав основні математичні співвідношення для електричних характеристик переходів.

Контактне електричне поле на переході Шотткі зосереджено практично тільки в напівпровіднику, так як концентрація носіїв заряду в металі значно більша концентрації носіїв заряду в напівпровіднику. Перерозподіл електронів в металі відбувається в дуже тонкому шарі, порівнянним з міжатоною відстанню. В залежності від типу електропровідності напівпровідника і від співвідношення роботи виходу в напівпровіднику може виникати збіднений, інверсний або збагачений шар. Якщо робота виходу в металі менша роботи виходу в напівпровіднику ($A_{\text{м}} < A_{\text{н}}$), то електрони з більшою ймовірністю будуть переходити з металу в напівпровідник. Це призводить до утворення в

напівпровіднику збідненого шару, якщо напівпровідник р-типу (рис. 1.1, а), або навіть інверсного шару, якщо $A_M \ll A_H$ (рис. 1.1, б). Якщо напівпровідник n-типу, то утворюється збагачений шар (рис. 1.1, в).

При протилежному співвідношенні робіт виходу ($A_M \gg A_H$) в напівпровіднику n-типу отримується збіднений або інверсний шар, а в дірковому – збагачений.

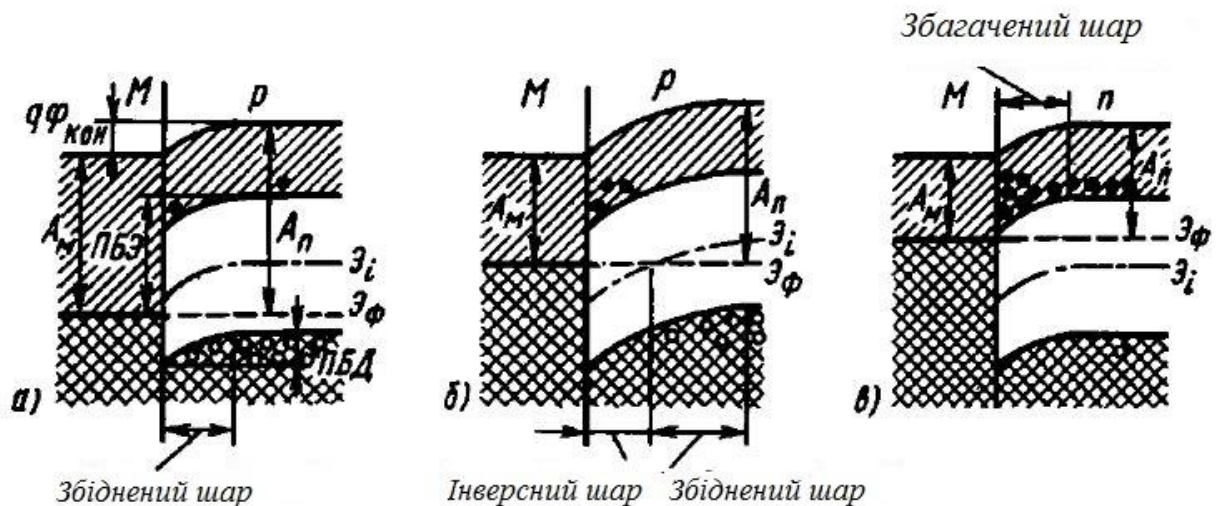


Рисунок 1.1 – Утворення збідненого (а), інверсного (б) і збагаченого (в) шарів в напівпровіднику поблизу металургійного контакту з металом при роботі виходу в металі меншій, ніж в напівпровіднику [2]

В збіднених шарах просторовий заряд формується в результаті порушення компенсації заряду іонізованих домішок основними носіями, а в збагачених – через накопичення основних носіїв заряду. Збагачений шар обумовлює малий опір приконтантної області напівпровідника в порівнянні з опором об'єму напівпровідника. Тому такий перехід не володіє випрямляючими властивостями. При наявності збідненого або інверсного шару перехід Шотткі володіє випрямляючими властивостями, так як зовнішня напруга, падаючи в основному на високоомному переході, буде змінювати висоту його потенціального бар'єру, змінюючи проходження носіїв заряду через перехід.

Характерною особливістю випрямляючого переходу Шотткі, на відміну від р-п переходу, являється різна висота потенціальних бар'єрів для електронів та дірок. В результаті через перехід Шотткі може не відбуватися інжекція неосновних носіїв заряду в напівпровідник.

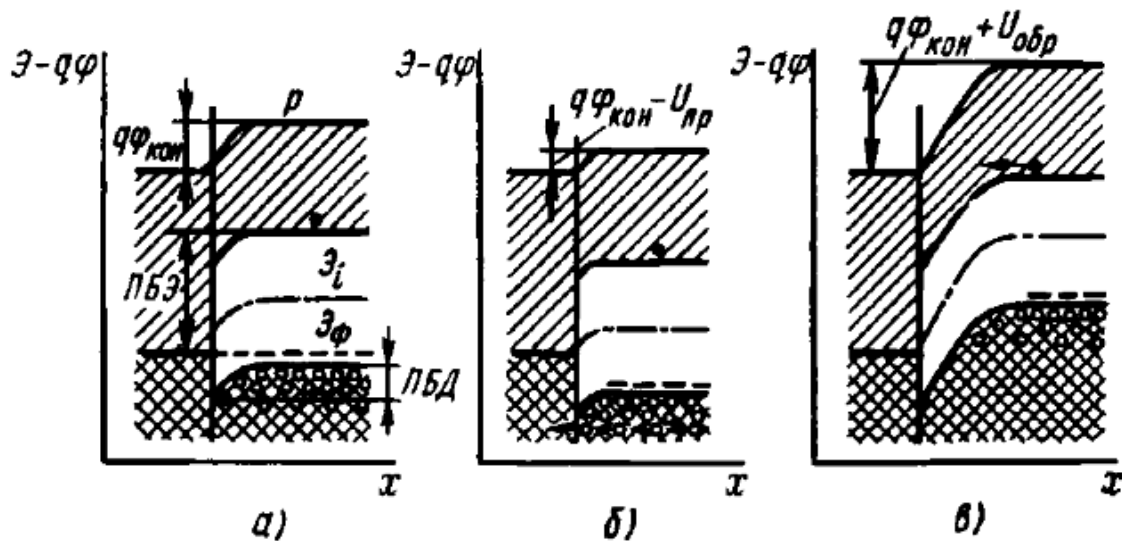


Рисунок 1.2 – Зміна висоти потенціального бар'єра на випрямляючому інжекційному переході між металом і напівпровідником при зміні зовнішньої напруги (а – зовнішня напруга відсутня; б – зовнішня напруга пряма; в – зовнішня напруга зворотна) [2]

Розглянемо рис. 1.2. При підключенні такого переходу в прямому напрямку (рис. 1.2, б), висота потенціального бар'єру для дірок (ПБД) в приконтатній області напівпровідника знижується, дірки будуть переходити з напівпровідника в метал. Чим більша пряма напруга, тим більша ймовірність такого переходу дірок. Однак при цьому висота потенціального бар'єру для електронів (ПБЕ), які можуть рухатись з металу в напівпровідник залишається ще досить великою. Тому потік електронів з металу в напівпровідник буде відносно малим, тобто практично не буде інжекції неосновних носіїв заряду в напівпровідник.

При іншій полярності зовнішньої напруги (при зворотній напрузі) потенціальний бар'єр для дірок підвищується (рис.1.2, в), і їх рух через перехід закінчується. Для неосновних носіїв заряду (для електронів в даному прикладі) поле в переході виявляється прискорюючим. Тому, проходячи через перехід,

неосновні носії заряду утворюють зворотній струм, який буде малим внаслідок малої концентрації неосновних носіїв в напівпровіднику.

Якщо різниця в роботах виходу велика, то в приконтатній області напівпровідника утворюється інверсний шар (рис. 1.2, б). В цьому випадку при малих прямих напругах через такий перехід буде відбуватися інжекція неосновних носіїв заряду з інверсного шару в прилеглий об'єм напівпровідника. При великих прямих напругах інверсний шар може зникнути.

В омічних переходах, утворених в результаті контакту між металом і напівпровідником, може відбуватися накопичення неосновних носіїв заряду внаслідок утворення потенціальної ями для неосновних носіїв в приконтатній області напівпровідника (рис. 1.3).

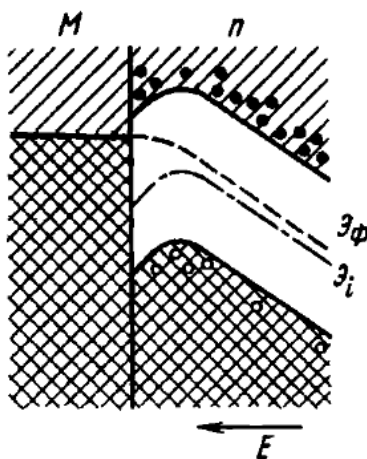


Рисунок 1.3 – Накопичення неосновних носіїв заряду (дірок) поблизу омічного переходу між металом і напівпровідником при наявності зовнішнього електричного поля [2]

Таке явище може впливати на швидкодію напівпровідникових пристроїв. Для усунення цього явища необхідно прибрати потенціальний бар'єр на контактах метал-напівпровідник шляхом підбору контактуючих пар матеріалів з однаковими роботами виходу. Однак практично це нездійсненно через обмежений набір матеріалів і необхідності підбирати метал заново для кожної концентрації домішок напівпровіднику і для кожної температури.

Для виключення ефекту накопичення неосновних носіїв заряду в напівпровіднику близько контакту можна провести додаткове легування приконтантної області напівпровідника. Потенціальний бар'єр при цьому залишається, але його товщина буде дуже малою через сильне легування приконтантної області напівпровідника. Мала товщина потенціального бар'єру забезпечить можливість тунелювання неосновних носіїв заряду в метал з потенціальної ями в напівпровіднику.

Розглянемо розподіл електричного поля та потенціалу в бар'єрі Шотткі, та його вольт-амперну характеристику.

Незалежно від полярності напруги для бар'єрних структур все зовнішнє поле буде прикладене до області просторового заряду, так як в цій області концентрація вільних носіїв значно менша, ніж в інших областях бар'єру Шотткі. Отримуємо наступні співвідношення розподілу електричного поля та потенціалу в бар'єрі Шотткі:

$$E(x) = -\frac{qN_D^+}{\varepsilon\varepsilon_0}(W-x) \quad (1.2)$$

$$\Psi(x) = -qN_D^+ \frac{(W-x)^2}{2\varepsilon\varepsilon_0} \quad (1.3)$$

Зі співвідношення (1.2) слідує, що електричне поле максимальне на границі напівпровідник – метал ($x = 0$), лінійно падає по області просторового заряду і рівне нулю на границі ОПЗ – квазінейтральний об'єм напівпровідника ($x = W$).

На рис. 1.4 та 1.5 зображено розподіл електричного поля та потенціалу в ОПЗ відповідно.

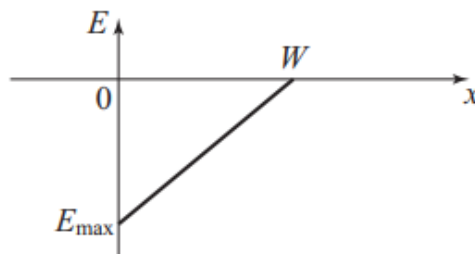


Рисунок 1.4 – Розподіл електричного поля в ОПЗ [3]

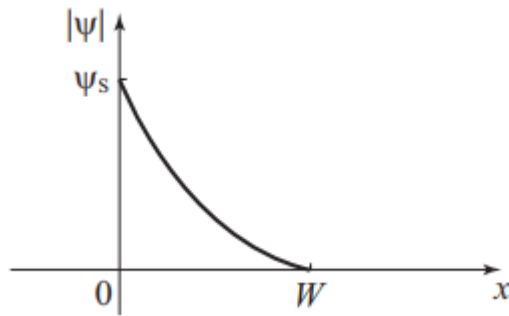


Рисунок 1.5 – Розподіл потенціалу в ОПЗ [3]

Вольт-амперна характеристика бар'єру Шотткі має яскраво виражений несиметричний вид. В області прямого зміщення струм експоненціально сильно росте з ростом прикладеної напруги. В області зворотніх зміщень струм від напруги не залежить. В обох випадках, при прямому і зворотньому зміщеннях, струм в бар'єрі Шотткі зумовлений основними носіями – електронами. По цій причині діоди на основі бар'єра Шотткі являються швидкодіючими пристроями, так як в них відсутні рекомбінаційні і дифузійні процеси. Несиметричність вольт-амперної характеристики бар'єру Шотткі – типова для бар'єрних структур. Залежність струму від напруги в таких структурах зумовлена зміною кількості носіїв, що приймають участь в процесах переносу заряду. Роль зовнішньої напруги полягає в зміні кількості електронів, що переходять з однієї частини бар'єрної структури в іншу. На рис. 1.6 зображена вольт-амперна характеристика бар'єру Шотткі.

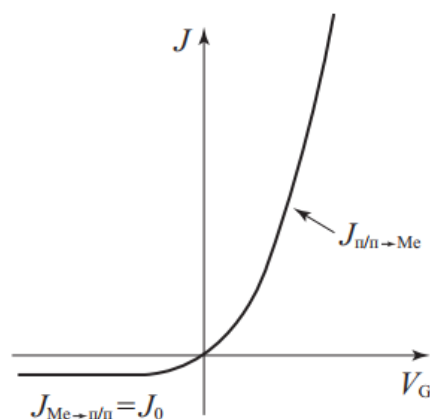


Рисунок 1.6 – Вольт-амперна характеристика бар'єру Шотткі [3]

1.1.1. Діод Шотткі. Діод Шотткі – це напівпровідниковий діод, випрямні властивості якого засновані на взаємодії металу і збідненого шару напівпровідника. Для створення діодів Шотткі використовується перехід метал-напівпровідник. Робота цих діодів заснована на переносі основних носіїв і характеризується високою швидкістю. Так як в них відсутнє характерне для р-п переходів накопичення неосновних носіїв заряду, діоди Шотткі використовують в якості елементів інтегральних мікросхем, а також в якості дискретних пристроїв. Малопотужні діоди Шотткі виготовляються на основі кремнію і арсеніду галія n-типу і призначаються для перетворення сигналу НВЧ-діапазону (випрямлення, зміщення частот, модуляція) і для імпульсних пристроїв. Силкові (потужні) діоди Шотткі для силової напівпровідникової електроніки виготовляються на основі кремнію n-типу, мають робочі струми до декількох сотень ампер, виключно високу швидкість (в порівнянні з діодами на основі р-п переходів), але низькі робочі напруги, що не перевищують декількох вольт. Також діоди Шотткі використовують в якості світловипромінюючих пристроїв і в спіноелектроніці.

Розглянемо вольт-фарадну характеристику ідеального діода Шотткі, зображену на рис. 1.7.

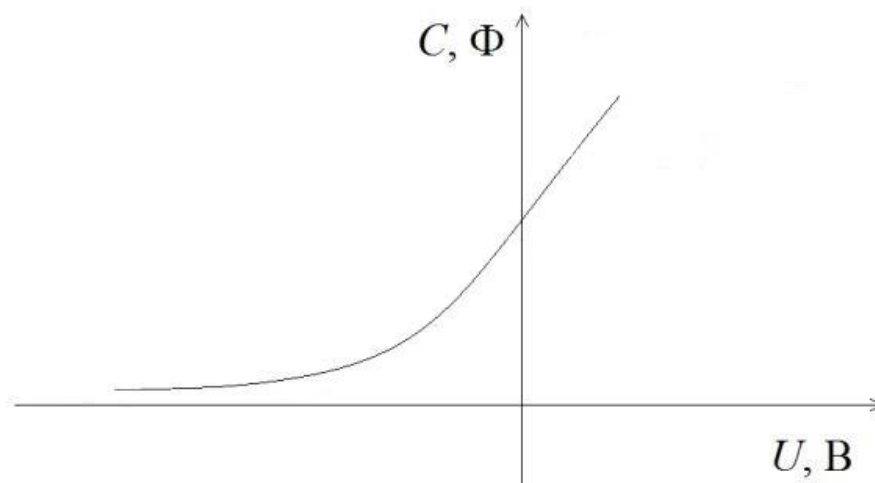


Рисунок 1.7 – Вольт-фарадна характеристика ідеального діода Шотткі [5]

При розгляді вольт-фарадних (C-V) характеристик діод Шотткі приймається за плоский конденсатор, обкладки якого утворюють металічний контакт і електронейтральний об'єм напівпровідника, а діелектрик – збіднений шар. Ємність такого шару по формулі для плоского конденсатора рівна:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d_{\text{опз}}} \quad (1.4)$$

де S – площа контакту, а $d_{\text{опз}}$ – товщина збідненого шару.

При додатній полярності напруги товщина збідненої області зменшується, при цьому ємність діода збільшується. При напрузі, близькій до висоти потенціального бар'єру відбувається різке збільшення струму, а збіднена область практично зникає. Це супроводжується різким зменшенням ємності діода до значення $\frac{\varepsilon_D \varepsilon_0 S}{L_D}$ (L_D – Дебаєвська довжина), так як при відсутності потенціального бар'єру не відбувається накопичення зарядів. При зворотному зміщенні діода Шотткі ширина ОПЗ збільшується, в результаті чого ємність зменшується. Зменшення ємності відбувається аж до досягнення напруги пробоя діода.

1.1.2. Фотодіод Шотткі. Фотодіоди з бар'ром Шотткі володіють дуже цікавими властивостями, наприклад, вони дозволяють підвищувати швидкодію до 10^{-10} с та вище. З точки зору застосування контакту метал-напівпровідник в фотодіодах, потрібно відзначити такі основні особливості. По-перше, в фотодіоді з бар'єром Шотткі з'являється можливість поглинання квантів випромінювання з енергією, меншою ніж ширина забороненої зони, в металі контакту. При цьому, якщо енергія кванта випромінювання більше висоти потенціального бар'єру, збудженні електрони з металу можуть перейти в напівпровідник через потенціальний бар'єр. В результаті довгохвильова границя спектральної характеристики фотодіода Шотткі зсувається в сторону більш довгих хвиль.

По-друге, в фотодіодах Шотткі з ростом енергії квантів область поглинання випромінювання зсувається в шар об'ємного заряду, де існує поле, що розділяє фотоносії. В фотодіоді з р-п переходом при малій глибині поглинання фотострум практично рівний нулю. Тому, короткохвильова границя спектральної характеристики фотодіода Шотткі розташована поблизу більш коротких хвиль. Взагалі спектральна характеристика фотодіода на основі контакту метал-напівпровідник значно ширше, ніж спектральна характеристика фотодіода з р-п переходом з того ж напівпровідника.

Фотодіоди Шотткі характеризуються переліком інших відмінних переваг, важливих з точки зору застосування пристроїв в оптоелектроніці:

- 1) малим опором бази фотодіода. Тому стала часу бар'єрної ємності $C_{\text{бар}}$ у фотодіодів Шотткі порядку 10^{-12} с і інерційність цих пристроїв визначається тільки часом прольоту фотоносіїв через область об'ємного заряду і становить $10^{-10} - 10^{-11}$ с;
- 2) поєднанням високої швидкодії і високої чутливості (~ 0.5 А/Вт);
- 3) простотою створення випрямляючих фоточутливих структур на різноманітних напівпровідниках (в тому числі і на таких, в яких не вдається створити р-п перехід) і, як наслідок цього, можливістю керування висотою потенціального бар'єру Шотткі [2-8].

1.2 Структура напівпровідник-напівпровідник

Гетероперехід – це контакт двох різних за хімічним складом напівпровідників (монокристалічних або аморфних), при чому кристалічна решітка одного матеріалу без порушення періодичності переходить в решітку іншого матеріалу. Для практичних застосувань найчастіше використовуються гетеропереходи, утворені монокристалами.

Розрізняють ізотипні і анізотипні гетеропереходи. Ізотипний гетероперехід створюється двома напівпровідниками одного типу провідності, на відміну від анізотипного, котрий утворюється напівпровідниками з різним видом провідності.

Розподіл електричного поля і потенціалу в області просторового заряду гетеропереходу зображений на рис.1.8.

При утворенні гетеропереходу, внаслідок різних робіт виходу електронів з різних напівпровідників, відбувається перерозподіл носіїв заряду в приконтактній області і вирівнювання рівнів Фермі в результаті встановлення термодинамічної рівноваги. Всі інші енергетичні рівні і зони повинні відповідно зігнутися, тобто в гетеропереході виникає дифузійне електричне поле і контактна різниця потенціалів.

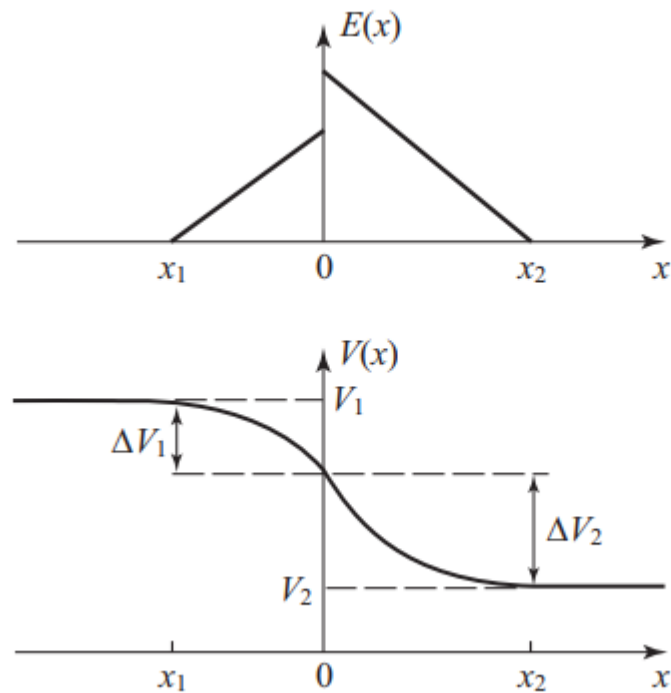


Рисунок 1.8 – Розподіл електричного поля і потенціалу в області просторового заряду гетеропереходу n-Ge – p-Ga-As [9]

Ширина забороненої зони різних напівпровідників відрізняється. Тому на межі поділу двох напівпровідників (на металургійному контакті гетеропереходу) зазвичай виникає розрив дна зони провідності. Розрив дна зони провідності визначається відмінністю енергій спорідненості до електрона двох контактуючих напівпровідників.

Розрив стелі валентної зони залежить як від різниці енергій спорідненості до електрона, так і від відмінності ширини заборонених зон контактуючих напівпровідників.

В результаті розриву дна провідності і стелі валентної зони висота потенціальних бар'єрів для електронів і дірок в гетеропереході виявляється різною. Це являється особливістю гетеропереходів на відміну від p-n переходів, які формуються в монокристалі одного напівпровідника.

Кожен з напівпровідників, що утворюють гетероперехід, може мати різний тип електропровідності. Тому для кожної пари напівпровідників в принципі можна здійснити чотири різновиди гетероструктур: $p_1 - n_2$; $n_1 - n_2$; $n_1 - p_2$ і $p_1 - p_2$.

Якщо поблизу межі поділу двох напівпровідників, що утворюють гетероперехід, виникають збідненні основними носіями шари (шари з підвищеним питомим опором), то основна частина зовнішньої напруги, прикладеної до структури з гетеропереходу, буде падати на збіднених шарах. Висота потенціального бар'єру для основних носіїв заряду буде змінюватися: зменшуватися при полярності зовнішньої напруги, протилежної полярності контактної різниці потенціалів, і збільшуватися – при збігу полярностей зовнішньої напруги і контактної різниці потенціалів. Таким чином, гетеропереходи можуть володіти ефектом випрямлення (рис. 1.9).

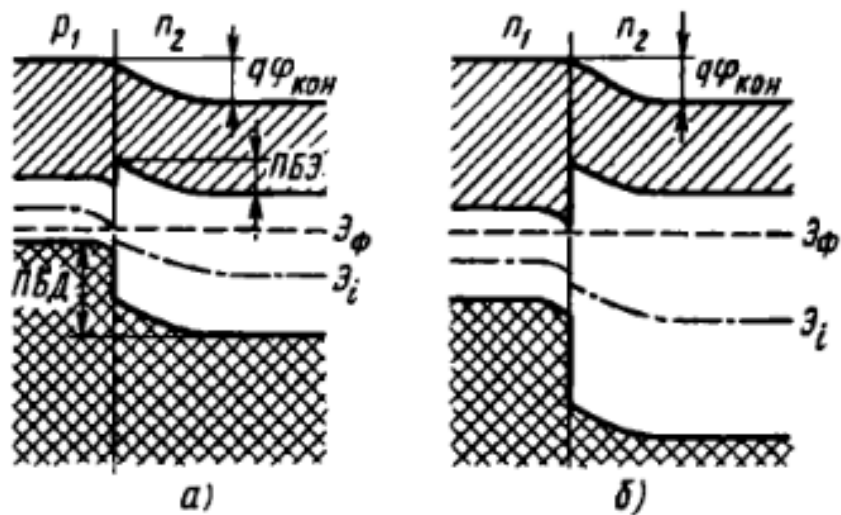


Рисунок 1.9 – Енергетичні діаграми гетеропереходів: а – випрямляючий гетероперехід між напівпровідниками з електропровідністю р- і n- типу з переважною інжекцією електронів у вузькозонний напівпровідник; б – випрямляючий гетероперехід між напівпровідниками з електропровідністю n- типу без інжекції неосновних носіїв заряду [2]

Внаслідок відмінності по висоті потенціальних бар'єрів для електронів і для дірок прямий струм через гетероперехід пов'язаний в основному з рухом носіїв заряду тільки одного знаку. Тому гетеропереходи можуть бути як інжектуючими неосновні носії (рис. 1.9, а), так і неінжектуючими (рис. 1.9, б). Інкєкція неосновних носіїв заряду відбувається завжди з широкозонного у вузькозонний напівпровідник. В гетеропереходах, утворених напівпровідниками з одним типом

електропровідності, випрямлення відбувається без інжекції неосновних носіїв заряду.

При дослідженні гетеропереходів надзвичайно важливою є вольт-фарадна характеристика, яка зображена на рис. 1.10 для частоти 15кГц, 200кГц та 2МГц.

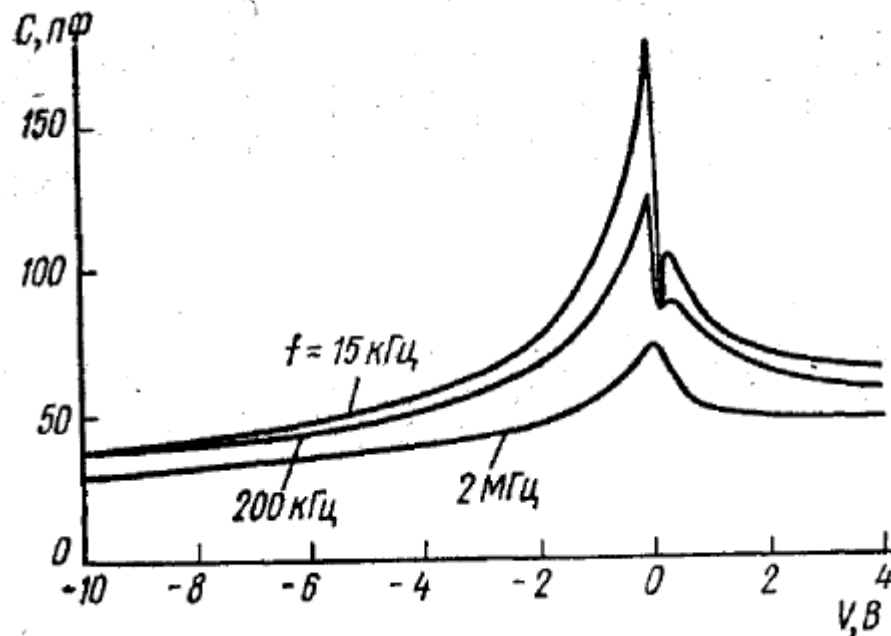


Рисунок 1.10 Залежність ємності гетеропереходу (n)Ge – (n)Si від прикладеної напруги на різних частотах [10]

Існує три моделі гетеропереходу:

- ідеальний гетероперехід
- неідеальний гетероперехід
- гетероперехід з проміжним шаром.

В ідеальному гетеропереході, на відміну від неідеального, на межі поділу матеріалів відсутні локальні енергетичні стани для електронів. Гетероперехід з проміжним шаром формується через шар кінцевої товщини і локальні енергетичні стани можуть існувати як в самому проміжному шарі, так і на границях його поділу.

Зазвичай напівпровідники різного хімічного складу відрізняються один від одного роботою виходу електронів, шириною забороненої зони, шириною дозволених зон та іншими параметрами. Однак, для формування якісного

гетеропереходу необхідно мати співпадання типу, орієнтації і періоду кристалічних решіток контактуючих напівпровідників, щоб кристалічна решітка одного напівпровідника з мінімальною кількістю порушень переходила в кристалічну структуру іншого напівпровідника. В ідеальному гетеропереході не повинно бути механічних напруг, структурних та інших дефектів, які можуть створити умови для інтенсивної рекомбінації і генерації носіїв заряду – рекомбінаційні пастки. При наявності в гетеропереході великої кількості рекомбінаційних пасток механізм проходження струму через такий реальний гетероперехід може суттєво відрізнятись від механізму проходження струму через ідеальний гетероперехід. Такий гетероперехід може і не мати ефекту випрямлення.

1.2.1 Гетероструктури. Гетероструктури – напівпровідникові структури з декількома гетеропереходами. Найбільш важливе застосування гетероструктури отримали в оптоелектронних пристроях – лазерах, світлодіодах, і т.д. Також вони застосовуються для створення приймачів оптичного випромінювання – фотодіодів, лавинних фотодіодів, фототранзисторів, фототиристорів, перетворювачів ІЧ-випромінювання в оптичне. Найбільшу швидкодію і чутливість мають гетероструктури типу n^+-n^0-P або p^+-p^0-N (+ означає сильно легування, 0 – слабе), що освітлюються через широкозонну область. Такі пристрої мають швидкодію $\sim 10^{-10}-10^{-11}$ с і квантову ефективність близьку до 100%. Змінюючи склад гетероструктури, можна в широких межах змінювати діапазон спектральної чутливості фотоприймачів.

Гетероструктури з прямозонними широкозонними напівпровідниками дозволяють створювати швидкодіючі діоди, транзистори і тиристори, що працюють при кімнатних температурах. Однак розглянуті області застосування гетероструктур не являються вичерпними. Їх унікальні властивості інтенсивно досліджуються, на основі результатів цих робіт створюються електронні пристрої з новими властивостями і їх суттєво покращеними характеристиками і параметрами.

1.2.2 Фотодіоди на гетероструктурах. Фотодіоди з гетероструктурою представляють собою один з найбільш перспективних типів оптоелектронних фотоприймачів. По суті, гетероструктура відкриває принципову можливість отримання фотодіода з ККД, близьким до 100%. Пристрій і зонна діаграма гетерофотодіода зображені на рис.1.13. Шар GaAlAs відіграє роль вікна, що пропускає випромінювання, яке поглинається в середній n-області (GaAs). Різниця в ширині забороненої зони по обидві сторони від гетеропереходу близько 0.4 еВ. Генеруючі в n-області під дією оптичного випромінювання дірки безперешкодно переносяться в p^+ область. Ширина активної n-області вибирається такою, щоб забезпечити поглинання всього випромінювання. Висока ступінь чистоти активної області, низька густина поверхневих станів границь між шарами забезпечують малі рекомбінаційні втрати фотоносіїв.

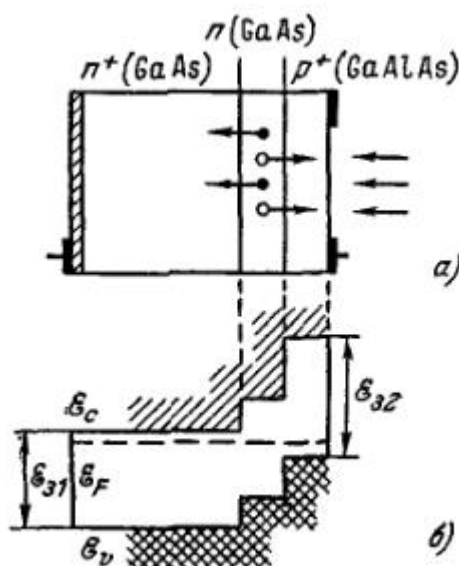


Рисунок 1.13 – Гетерофотодіод: а – структура, б – енергетична діаграма [4]

Таким чином, при виключно високому ККД гетерофотодіоди зберігають переваги розглянутих вище структур: поєднання високої чутливості з високою швидкодією, малі робочі напруги.

Гетероструктура дозволяє, вибравши підходящі пари напівпровідників для фотодіодів, працювати практично в будь-якій частині оптичного діапазона довжин хвиль. Ця перевага обумовлена тим, що в гетероструктурі робоча довжина

хвилі визначається різницею ширини заборонених зон і не пов'язана з спектральною характеристикою глибини поглинання. Основним недоліком гетерофотодіодів являється притаманна гетеропереходам складність виготовлення [2, 4, 9–15].

1.3 Структура метал-діелектрик-напівпровідник

Багатошарові структури метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-структури) пов'язані з розвитком планарної технології і лежать в основі напівпровідникових пристроїв, в яких використовується ефект поля: пристроїв з зарядовим зв'язком, польових транзисторів з ізолюваним затвором і т.д. МДН-структури широко використовуються для дослідження фізичних процесів на межі поділу діелектрика з напівпровідниками.

Найпростіша МДН-структура представляє собою багатошарову структуру, що містить монокристалічну пластину напівпровідника з омичним контактом, на вільну планарну поверхню якої нанесений шар діелектрика, покритий металічним електродом (рис. 1.14).

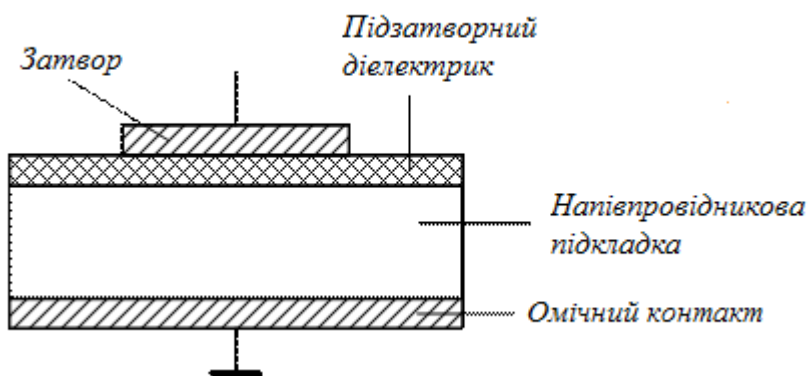


Рисунок 1.14 – Структура метал-діелектрик-напівпровідник [16]

Найчастіше в якості напівпровідника в МДН-структурах використовують кремній, а роль діелектрика виконує діоксид кремнію (SiO_2), тому для МДН-структур вживається також назва МОН-структури (метал-оксид-напівпровідник). Товщина підзатворного шару діелектрика може варіюватись в діапазоні від 15-20

до $1-2 \cdot 10^3 \text{ Å}$, а лінійні розміри МДН-структур вздовж поверхні підкладки складають величини від декількох мікрон до декількох міліметрів та більше.

Найпростіша МДН-структура являється МДН-конденсатором, ємність якого залежить від напруги між електродами. Напруга, прикладена до МДН-структури вважається позитивною, якщо на затвор подано позитивний потенціал відносно омічного контакту до підкладки, і негативним, якщо на затвор відносно омічного контакту до підкладки подано негативний потенціал.

При аналізі МДН-структур широко використовують модель ідеальної МДН-структури, для якої характерні наступні припущення:

- 1) термодинамічні роботи виходу електронів з металу і напівпровідника однакові, тому при відсутності зовнішнього електричного поля енергетичні зони напівпровідника не вигнуті (стан плоских зон);
- 2) поверхневі стани на межі поділу напівпровідник-діелектрик, а також заряджені частинки в шарі діелектрика відсутні, тому при дії будь-яких зовнішніх електричних полів виникають тільки заряд в підкладці і рівний йому по величині заряд протилежного знаку на затворі;
- 3) при дії постійної зовнішньої напруги будь-якої величини відсутній перенос носіїв заряду через шар діелектрика, тобто опір діелектрика постійному струму нескінченно великий.

МДН-структури, близькі до ідеальних, отримують, використовуючи “хлорну” технологію термічного вирощування двоокису кремнію на кремнії, причому для кремнію n-типу в якості матеріалу затвора використовують алюміній, а для кремнію p-типу використовують золото.

МДН-структури, для яких не виконується хоча б одне з вище перелічених допущень, називаються реальними МДН-структурами.

Зонні енергетичні діаграми ідеальної МДН-структури в рівноважних умовах представлені на рис.1.15

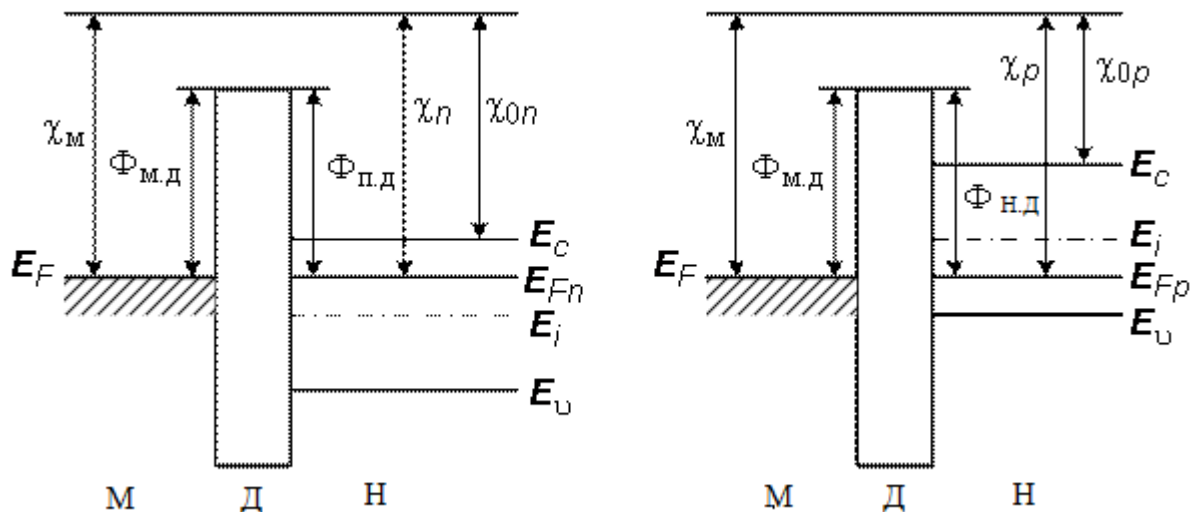


Рисунок 1.15 – Зонні енергетичні діаграми ідеальної МДН-структури в рівноважних умовах [16]

При подачі на МДН-структуру зовнішньої напруги під затвором виникає електричне поле. Так як в ідеальному діелектрику відсутні незв'язані заряди, електричне поле в ньому не екранується, а проникає в приповерхневий шар підкладки, де викликає зміну концентрації носіїв заряду. В залежності від полярності і величини прикладеної напруги, приповерхневий шар підкладки виявляється або в режимі збагачення, збіднення, або інверсії.

Якщо на МДН-структуру подано позитивну напругу, напруженість електричного поля направлена від затвору до підкладки. В напівпровіднику *n*-типу, таке поле притягує вільні електрони з об'єму напівпровідника до межі поділу напівпровідник-діелектрик. В результаті в приграничній області напівпровідника виникає об'ємний негативний заряд, який внаслідок дифузійного вирівнювання концентрації електронів розташовується в шарі кінцевої товщини, що називається областю просторового заряду (ОПЗ). Так як концентрація основних носіїв заряду (електронів) в ОПЗ більша, ніж в об'ємі кристалу, то ОПЗ являється збагаченим шаром, а МДН-структура знаходиться в режимі збагачення. Електричне поле зменшує величину потенціальної енергії електронів в ОПЗ, в порівнянні з енергією електронів в об'ємі напівпровідника, тому краї

енергетичних зон в ОПЗ вигнуті вниз, тобто на межі поділу напівпровідника і діелектрика для електронів утворюється потенціальна яма (рис. 1.16). В шарі діелектрика через відсутність об'ємного заряду напруженість електричного залишається сталою, тому енергія електронів при переході від затвору до напівпровідника збільшується по лінійному закону.

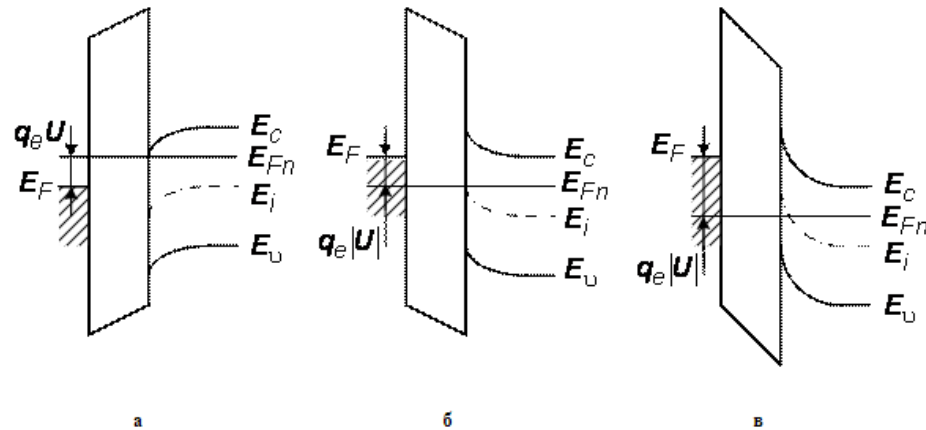


Рисунок 1.16 – Зонні енергетичні діаграми МДН-структур з напівпровідником n-типу в режимі збагачення (а), збіднення (б) і інверсії (в) [16]

При подачі на МДН-структуру від'ємної напруги напруженість електричного поля направлена від підкладки до затвору. Якщо в якості підкладки використовується напівпровідник n-типу, то електричне поле відштовхує електрони від межі поділу напівпровідник-діелектрик в глиб об'єму напівпровідника. Коли прикладена від'ємна напруга невелика, в приграничній області напівпровідника виникає об'ємний позитивний заряд, утворений некомпенсованими іонами донорної домішки. Так як концентрація основних носіїв заряду (електронів) в ОПЗ менша, ніж в об'ємі кристалу, то ОПЗ являється збідненим шаром, а МДН-структура знаходиться в режимі збіднення. Електричне поле викликає збільшення потенціальної енергії електронів в ОПЗ, в порівнянні з енергією електронів в об'ємі напівпровідника, тому краї енергетичних зон в ОПЗ вигнуті вгору, тобто у межі поділу напівпровідника і діелектрика для електронів утворюється потенціальний бар'єр (рис. 1.16, б). В шарі діелектрика енергія

електронів при переході від затвору до напівпровідника зменшується по лінійному закону.

При великих від'ємних напругах енергетичні зони викривляються вверх настільки сильно, що поблизу границі напівпровідника і діелектрика рівень Фермі перетинає середину забороненої зони. В цьому випадку дірки витісняються з об'єму напівпровідника до межі поділу з діелектриком, утворюючи приграничний заряджений шар, в якому дірки стають основними, а електрони – неосновними носіями заряду. Через інверсію електропровідності даний шар називається інверсним. При утворенні інверсного шару МДН-структура знаходиться в режимі інверсії. При цьому в ОПЗ напівпровідника існує два шари: інверсний і збіднений (рис. 1.16, в).

1.3.1 Ємність МДН-структур та МДН варікапи. Ємність МДН-структури, або ємність затвору, представляє собою послідовне з'єднання ємності діелектрика C_d і приповерхневої ємності напівпровідника C_s . Графік реальної залежності ємності затвору від напруги на затворі показаний на рис. 1.17, так звана вольт-фарадна характеристика МДН-структури.

Якщо $U_3 > 0$ і напівпровідникова підкладка має електронний тип провідності, то поблизу поверхні напівпровідника накопичуються електрони. Приповерхневий шар напівпровідника при цьому можна розглядати як металічну пластину, а питому ємність затвора вважати рівною ємності діелектрика:

$$C_3 = C_d = \epsilon_0 \epsilon_d / a \quad (1.5)$$

При переході МДН – структури в режим збіднення ($U_3 < 0$) утворюється ОПЗ і починає даватись вплив приповерхневої ємності C_3 , значення якої залежить від напруги на затворі.

При перевищенні U_3 значення порогової напруги в МДН-структурі відбувається інверсія провідності приповерхневого шару: поверхнева концентрація дірок в інверсному шарі росте експоненціально з напругою, а поверхневий потенціал збільшується пропорційно квадрату товщини збідненої області l_0 . Після того як значення l_0 досягає максимальної величини, подальший

приріст негативного заряду на затворі буде компенсуватися зростанням концентрації дірок в каналі. Поява надлишкових дірок забезпечується достатньо повільною генерацією електронно-діркових пар в ОПЗ. Тому, якщо до постійної напруги U_3 додається мала змінна напруга dU_3 з високою частотою, концентрація дірок в каналі не встигає змінюватися з частотою змінної напруги і ємність МДН-структури залишається сталою (рис. 1.17, крива 1).

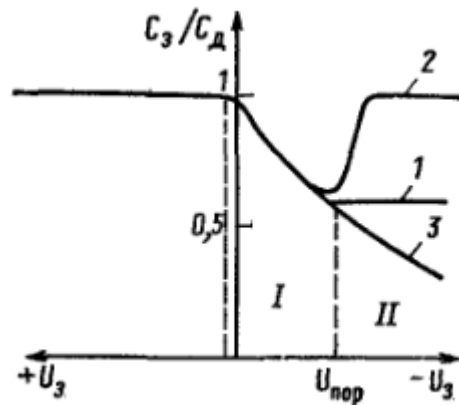


Рисунок 1.17 – Вольт-фарадна характеристика МДН-структури в режимі збіднення і інверсії [4]

Якщо ж частота зміни U_3 низька, то концентрація дірок змінюється, і ємність затвору приближається до ємності діелектрика (рис. 1.17, крива 2).

При подачі імпульсу напруги на затвор, його ємність і загальна ємність МДН-структури буде зменшуватися (рис. 1.17, крива 3).

На рис. 1.18 зображена вольт-фарадна характеристика МДН-структури з підкладкою р- і n-типу.

МДН варіапи характеризуються високими значеннями вхідного опору, добротності, коефіцієнта перекриття по ємності і працюють при будь-якій полярності напруги. Для досягнення значних величин перекриття по ємності і крутизни вольт-ємнісної характеристики в МДН пристроях необхідно використовувати діелектричні матеріали з високими значеннями діелектричної проникності, до яких зокрема відносяться оксид кремнію і оксиди рідкоземельних

елементів. Підзатворний діелектрик МДН структури повинний задовольняти наступним вимогам:

- бути термодинамічно стійким в контакті з напівпровідником;
- дифузія кисню не повинна призводити до утворення шару змінного складу, або у випадку наявності цього шару, його товщина не повинна бути меншою ніж товщина SiO_2 ;
- оксиди повинні формувати поверхню поділу з Si високої якості, з невеликою кількістю поверхневих станів і дефектів в межах ширини забороненої зони.

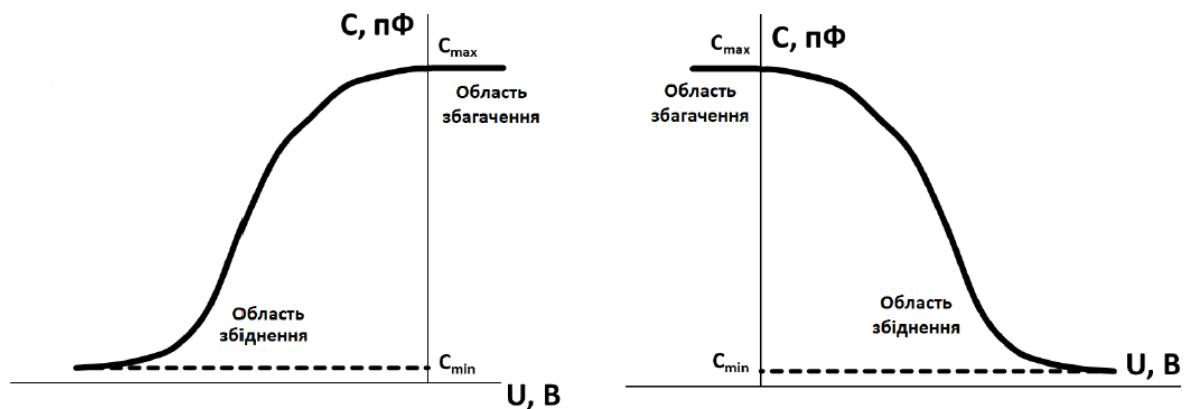


Рисунок 1.18 Вольт-фарадні характеристики для напівпровідника р-типу (а) та n-типу (б) [16]

В якості діелектричної плівки у варікапах можуть використовуватись: DyO_2 - Gd_2O_3 , Sm_2O_3 , Ce_2O_3 , Yb_2O_3 , SiO_2 , тощо. Оксиди рідкоземельних елементів у МДН структурах, як правило, характеризуються високою стабільністю діелектричних і електричних властивостей, високою діелектричною проникністю (8-28), хімічною стійкістю, а також великою шириною забороненої зони.

МДН варікапи з двошаровою діелектричною плівкою DyO_2 - Gd_2O_3 характеризуються коефіцієнтом перекриття по ємності $K = 8-12$, і щільністю поверхневих станів $5,6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ еВ}^{-1}$. Температура підкладки зразків становила 500-520 °C, а частота тестового сигналу – 1 МГц. Експериментальні криві були зміщені відносно ідеальних в сторону від'ємних напруг, що означає наявність

вбудованого позитивного заряду на межі поділу н/п – діелектрик. Наявність цього заряду характерна для термічно вирощених окисних плівок [17].

Для МДН варікапів з діелектричною плівкою Sm_2O_3 коефіцієнт перекриття по ємності становив 4-6, а щільність поверхневих станів – $3,6 * 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ eV}^{-1}$. Плівки наносилися при температурі підкладки 500-550 °С, частота тестового сигналу для вимірювань становила 1 МГц. Вольт-фарадні залежності даного зразку мають типовий високочастотний вид і практично не проявляють гістерезисних явищ. Область керуючих напруг, що відповідає зміні ємності МДН структури, лежить в межах від -2 до +3 В. Експериментальні ВФХ трохи зміщені в сторону додатних значень напруги відносно теоретичної ВФХ ідеальної МДН-структури, що свідчить про наявність незначного негативного заряду в діелектрику. Залежності тангенса кута діелектричних втрат і провідності від напруги мають максимум при напрузі плоских зон і тенденцію до насичення в області напруг, відповідних інверсії на поверхні напівпровідника [18].

МДН варікапи з плівкою CeO_2 характеризувались щільністю поверхневих станів від $1,58 * 10^{11}$ до $2,02 * 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ в залежності від температури підкладки зразків, що варіювалась від 175 до 200 °С. Частота тестового сигналу становила 1,2 МГц. Дослідження особливостей протікання електронних процесів на поверхні напівпровідника в МДН-структурах проводилися методом високочастотних C-V характеристик, а визначення електрофізичних параметрів системи відбувалось по експериментальним даним C-V характеристик. [19].

Для МДН варікапів з діелектричною плівкою Yb_2O_3 коефіцієнт перекриття ємності становив 2,5 – 3, а щільність поверхневих станів – $(1-2) * 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ eV}^{-1}$. Температура підкладки зразків становила 500 – 550 °С, а частота тестового сигналу – 1 МГц. Вольт-фарадні характеристики даних структур мали типовий високочастотний вид і не проявляли гістерезисних явищ. Область управляючих напруг, що відповідає зміні ємності МДН систем лежить в межах від -3 до +2 В. Експериментальні характеристики мали незначне зміщення в сторону від’ємних значень напруги відносно теоретично розрахованих C-V залежностей ідеальних МДН структур [20].

1.3.2. МДН-фотоварікапи. В основі роботи фотоварікапів лежить ефект зміни ємності структури під дією світла. Причиною зміни ємності є зменшення ширини області просторового заряду за рахунок збільшення кількості носіїв заряду при освітленні.

МДН фотоварікапи конструктивно являють собою кремнієву підкладку, на якій нанесено діелектричну плівку, а також систему фронтальних та тильних контактів. Однією з найважливіших структурних частин фотоварікапу є його діелектрична плівка. В якості високоомної плівки використовують оксид кремнію, сульфад кадмію, оксид церію, оксид лютецію, оксид ербію, оксид самарію, тощо. Основними вимогами до діелектричних плівок є: висока електрична міцність, велике значення діелектричної проникності, висока прозорість в певній області спектру (в області фоточутливості) та стійкість до впливу оточуючого середовища. Крім того, в фоточутливих МДН приладах для підвищення відношення сигнал-шум необхідно зменшувати товщину шару діелектрика, не знижуючи електричної міцності.

Основними характеристиками і параметрами фотоварікапу є його вольт-фарадна характеристика (ВФХ), коефіцієнти перекриття по ємності у темновому (Кт) і світловому (Ксв) режимах, а також коефіцієнт фоточутливості ємності фотоварікапа (δC_f , %). В якості високоомної плівки можуть використовуватися оксиди рідкоземельних елементів, що володіють високою діелектричною проникністю, але мають досить високу вартість вихідних матеріалів, радіоактивні, і потребують надвисокої чистоти технологічного процесу. Також в якості діелектричної плівки може використовуватись оксид кремнію, що має меншу діелектричну проникність, але в той же час є поширеним в природі, має відносно низьку вартість виготовлення і відсутність токсичних і радіоактивних елементів в технологічному процесу, дає змогу низькотемпературного синтезу і є сумісним з інтегральною технологією виготовлення мікросхем.

Для МДН фотоварікапу з плівкою CdZnTe коефіцієнт перекриття по ємності у світловому режимі становив $(2-3) \cdot 10^2$ при освітленості 10^5 лк. Плівки наносилися на кремнієву підкладку за температури від 373 до 763 К. Вимірювання

проводилися на частоті тестового сигналу 1 кГц, а також досліджувалися вольт-фарадна та спектральна характеристики. Розглянуті МДН-структури володіють не лише високими коефіцієнтами перекриття по ємності, а також можуть працювати в дуже широкому інтервалі освітленості (до 10^5 лк). Дані фотоварікапи володіють добре вираженою спектральною чутливістю з максимумами 550-850 нм для CdS варікапів і 800-950 нм для CdZnTe фотоварікапів [21].

МДН фотоварікап з плівкою Lu_2O_3 характеризується коефіцієнтом перекриття у світловому режимі $K_{\text{св}} = 4 - 4,5$ при освітленості від 500 до 33000 лк. Температура підкладки для даного зразку – 500 °С. Діелектрична проникність плівки становила 12-13, а частота тестового сигналу – 1 МГц. Основними досліджуваними характеристиками були вольт-фарадні залежності, а також залежності провідності і тангенса кута діелектричних втрат від напруги. Експериментальні ВФХ були зміщені в сторону додатних значень напруги відносно теоретично розрахованих С-V залежностей ідеальних МДН-структур, що свідчить про наявність негативного заряду в діелектрику і на межі поділу з кремнієм. При зростанні освітленості інверсна ємність МДН-структури збільшувалась, що обумовлено генерацією електронно-діркових пар в приповерхневому шарі напівпровідника і ростом області просторового заряду кремнієвої підкладки. Залежності тангенса кута діелектричних втрат і провідності від напруги мають максимум при напрузі плоских зон і тенденцію до насичення в області напруг, відповідних інверсії на поверхні напівпровідника [23].

1.3.3. МДН-фототранзистори. МДН-фототранзистор представляє собою польовий транзистор з ізольованим затвором, в якому світловий потік, що поглинається в підзатворній області призводить до зміни провідності каналу між стоком і витком. Викликане світлом збільшення струму призводить до зміни порогової напруги і крутизни передаточної характеристики. Електрод затвору повинен бути виготовлений з прозорого або напівпрозорого матеріалу.

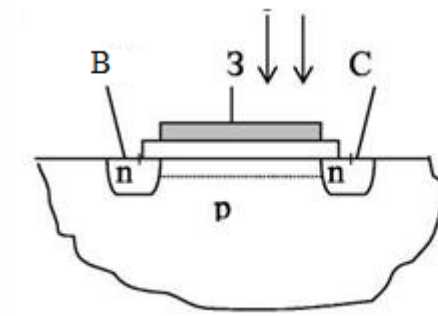


Рисунок 1.19 – Структура МДН-фототранзистора [25]

МДН-фототранзистор, таким чином, являється аналогом фоторезистора, але може бути використаний в будь-якому режимі підзатворного каналу: збагачення, збіднення, інверсії. Структура фототранзистора зображена на рис. 1.19. МДН-фототранзистори являються зручними фоточутливими елементами для створення багатоелементних фотоприймачів [4, 7, 23–27].

2. МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА ОЦІНКИ ЯКОСТІ МЕЖІ ПОДІЛУ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР

2.1. Структурні дефекти межі поділу напівпровідникових структур

Структурні дефекти – це енергетично збуджені стани кристалічної решітки, що пов'язані з порушенням суворої регулярності і способу заповнення вузлів кристалічної решітки.

Існує декілька способів класифікації дефектів. Найпростіші з них наступні: розподіл дефектів на власні та домішкові, а також розгляд дефектів з позиції рівноваги в системі (рівноважні та нерівноважні).

Домішкові дефекти, як слідує з назви, обумовлені присутністю чужорідних атомів або молекул. Власні дефекти не міняють якісний склад кристалу (може змінюватися лише кількісний склад). Їх утворення пов'язано з впливом температури, механічних, радіаційних та інших впливів на тверду фазу.

Концентрація рівноважних дефектів для конкретного кристалу однозначно залежить від температури. При підвищенні температури концентрація таких дефектів зростає, а при її зниженні – зменшується, причому при поверненні кристалу в вихідний стан, концентрація в точності буде відповідною до вихідної.

Нерівноважні дефекти також піддаються впливу температури, але при поверненні кристалу в вихідний стан, концентрація домішок не відновлюється.

Найбільш детальною являється класифікація дефектів за геометричними ознаками. Виділяють 4 класи дефектів: точкові, лінійні, поверхневі та об'ємні.

- 1) Точкові (нульвимірні) – це дефекти, розміри яких по всім напрямкам не перевищують декількох атомних діаметрів. Вони складаються з одного атома (якщо це атом домішки) або дефектної позиції (якщо кристал не містить домішкових атомів).
- 2) Лінійні (одновимірні) дефекти – це порушення лінійної послідовності вузлів решітки, вздовж якої руйнується періодичність структури.

- 3) Поверхневі (двовимірні) дефекти – це невідповідності в накладенні шарів атомів, а також границі, що відділяють різні області ідеальної або близької до ідеальної періодичної структури кристала.
- 4) Об'ємні (тривимірні) дефекти – мають в тривимірному просторі відносно великі розміри, порівняні з величинами атомних діаметрів. До них відносяться мікропустоти, пори, тріщини і т.д. [28].

Численні теоретичні та експериментальні дослідження, а також практика напівпровідникового приладобудування, установили сильну залежність властивостей і поведінку напівпровідникових об'єктів, пристроїв від стану, методів обробки і умов існування поверхні напівпровідника. Це, в першу чергу, пов'язано з тим, що в більшості сучасних приладів напівпровідникової мікроелектроніки активною областю приладу, як правило, являється дуже тонкий шар напівпровідника, приповерхнева область або межу поділу двох середовищ.

Ці особливості обумовлені існуванням дозволених електронних станів – поверхневих станів (ПС) в межах поверхні в забороненій зоні напівпровідника, подібно локальним домішковим станам в об'ємі кристалу – донорам і акцепторам.

Порівнюючи локальні поверхневі стани і об'ємні домішкові стани, слід відзначити ще одну властивість ПС. Поверхневі стани, що походять з незаповненої зони (зони провідності), в нейтральному стані не мають електрона, а, захопивши його, стають негативно зарядженими, тобто ведуть себе подібно акцепторним домішковим рівням в об'ємі напівпровідника, хоча і розташовані у верхній половині зони. Відповідно рівні, що походять із заповненої зони, в нейтральному стані містять електрон, який при збудженні може перейти в зону провідності, залишаючи при цьому на поверхневому донорі статичний додатній заряд. Поверхневі донори розташовуються в нижній половині забороненої зони на поверхні.

В технологічному циклі обробки поверхні напівпровідників існують громіздкі багатопараметричні процеси, інтерпретувати які доволі складно, так як в кожному конкретному випадку отримуються різні поверхневі фази.

Наряду з можливою появою поверхневих станів сильним є вплив навколишнього газового середовища, так як не виконуються умови надвисокого вакууму. Адсорбція призводить як до появи шару адсорбату на активній поверхні напівпровідника, що сильно змінює всі поверхневі стани напівпровідника, так і до появи стійкого окисного шару. В багатьох наукових роботах дослідники поділяли поверхневі стани реальної поверхні на «швидкі» та «повільні» на основі різниці часу взаємодії цих станів із зонами. Зазвичай, «повільними» вважаються стани, що розташовані на зовнішній поверхні поверхневого окислу, а «швидкими» стани, розташовані на границі поділу кристал-окисел.

Будь-яка поверхня має дефекти. Розрізняють макродефекти та мікродефекти.

Макродефекти – це порушення періодичної структури, що захоплюють області, які значно перевищують по своїм розмірам сталу решітки. До них відносяться: 1) тріщини в поверхні, пори, сходинок, дислокації; 2) макроскопічні включення сторонніх атомів та ін.

Мікродефекти – це порушення того ж розміру, що і постійна решітки. До них відносяться: 1) пустий вузол (вакансія), утворений в результаті видалення з поверхневого шару решітки атомів або іона; 2) атом або іон решітки, викинутий на поверхню; 3) чужорідний атом або іон, що знаходиться на поверхні або впроваджений в міжвузол в поверхневому шарі; 4) чужорідний атом або іон, що заміщує власний атом в поверхневому шарі.

Частинки, хемосорбовані на поверхні, також можуть розглядатися як дефекти поверхні, так як їх наявність порушує періодичну структуру поверхні. Хемосорбована частинка здатна захопити вільний електрон або вільну дірку, переходячи з електрично-нейтрального стану в заряджений. При цьому електрон і дірка, що захоплюються, залучаються до участі в хемосорбованому зв'язку.

Електричні властивості багатошарових систем напівпровідник-діелектрик в значній мірі визначаються структурними особливостями межі поділу і діелектричного шару.

Існує декілька підходів щодо структури та електричних властивостей таких складних систем.

1) Межу поділу діелектрик-напівпровідник можна представити як поверхню, яка має недосконалість наступних типів: а) дефекти структури (біографічні – дефекти, природа і концентрація яких визначаються перш за все обробкою, якій піддавалася поверхня на протязі всього попереднього періоду, теплові – дефекти, концентрація яких залежить від зміни температури зразка, і т.д.); б) розірвані (некомпенсовані) валентні зв'язки, що відіграють роль електрично-активних центрів.

Така інтерпретація електрофізичної поведінки двошарової системи надає суттєве значення процесам активації і анігіляції некомпенсованих валентних зв'язків (при їх взаємодії з домішками та дефектами).

2) Більш загальний підхід розглядає межу поділу напівпровідник-діелектрик як складну систему, що складається з декількох різних по властивостям шарів: монокристалічна область напівпровідника – власне межа поділу (тонкий шар) – пригранична область діелектричного шару – аморфна діелектрична плівка.

Діелектричні плівки на поверхні напівпровідників, як правило, характеризуються специфічним товщинним розподілом фізичних властивостей і, відповідно, володіє анізотропними характеристиками.

Наприклад, поблизу межі поділу Si – SiO₂ є тонкий перехідний шар ($1 \dots 5 \cdot 10^2$ Å), що володіє фізичними характеристиками, значно відмінними від властивостей шарів, більш віддалених від границі. В «товщині» ж окисел може мати доволі складну субкристалічну структуру.

Важливим є те, що окрім домішок пригранична область діелектрик-напівпровідник зазвичай містить велику кількість дефектів (точкові, дислокації, петлі і т.д.), які повністю визначаються процесами формування окисної плівки.

Енергія зв'язку Si-Si в об'ємі складає 2 еВ, на поверхні і поблизу дефектів ~ 1,5 еВ. В той же час енергія зв'язку Si-O значно вища і може досягати 8,4 еВ. Таким чином, при термічному окисненні, коли розривається зв'язок Si-Si і

встановлюється більш міцний зв'язок, виділяється більш значна енергія (~ 5 eV). Вона в 2,5 – 3 рази перевищує енергію утворення елементарного дефекту в кремнії. Саме така умова, як відомо, являється необхідною для ефективного розвитку процесу дефектоутворення. В умовах нерівноважного процесу формування межі поділу це може служити причиною виникнення сильно деструктурованого приповерхневого шару Si, який по мірі просування вглиб монокристала переходить в полікристалічний, а потім в блочний шар кремнію [30].

2.2 Основні методи дослідження електрофізичних властивостей межі поділу.

Дослідження реальних МДН-структур дає необхідну інформацію для визначення електрофізичних властивостей як самої структури в цілому, так і її складових: напівпровідника, межі поділу напівпровідник-діелектрик, діелектрик-метал, діелектричної плівки. Таку інформацію можна отримати за допомогою вимірювання провідності ОПЗ, ємнісних, фотоелектричних, комбінаційних методів. Найбільше розповсюдження отримали методи вимірювання залежності ємності структури від напруги і диференціальної провідності від напруги.

В залежності від способу вимірювання ємності і швидкості подачі напруги зміщення на МДН-структуру розрізняють рівноважні ВЧ та НЧ методи, метод нерівноважних ВЧ C-V характеристик і метод динамічних C-V характеристик. Різноманітні модифікації C-V метода добре доповнюють один одного і володіють великою інформативністю. Аналіз високочастотної ВФХ дозволяє визначити поверхневий заряд, густину поверхневих станів і їх розподіл по енергії, а також обчислити рівень легування підкладки. Повний аналіз ВФХ достатньо складний для експрес-розрахунків, тому розглядаються спрощені методи розрахунку електрофізичних властивостей структур.

2.2.1. Методика визначення основних параметрів напівпровідників у складі МДН структур. Рівноважна ВЧ C-V характеристика МДН-структури,

виміряна будь-яким способом, дозволяє визначити тип провідності напівпровідника. Так, зменшення ВЧ-ємності при зміні U-зміщення від додатного до від'ємного свідчить про електронну провідність, а збільшення – про діркову провідність. Під рівноважними ВЧ C-V характеристиками розуміються такі, які знімаються при умові, якщо досліджувані процеси перезаряду не встигають відбуватися слідом за напругою зміщення.

Для того, щоб виключити вплив на ВЧ C-V характеристику перезаряду поверхневих станів, локалізованих далі 0,3 еВ від краю зони основних носіїв, і процесу генерації неосновних носіїв в МДН-структурі на кремнії, тривалість імпульсу зміщення повинна бути не менше 10 мс. На основі такої нерівноважної ВЧ C-V характеристики в режимі збіднення може бути розрахований профіль легування приповерхневої області напівпровідника:

$$N(x) = -\frac{C^3}{q\epsilon_S S^2} \left(\frac{dC}{dV}\right)^{-1} \quad (2.1)$$

$$X = \epsilon_S S \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{max}}\right) \quad (2.2)$$

Розрахунок профілю домішки по глибині за допомогою даних рівнянь має обмеження знизу та зверху. Рівняння справедливі для глибин $X < 2 < L_D$. Обмеження по максимальній глибині пов'язане з настанням явища поверхневого пробоя, коли напруженість електричного поля на поверхні напівпровідника перевищує критичне значення [23, 29].

Мінімальна ємність МДН-структури в режимі сильної інверсії визначається концентрацією вільних носіїв заряду в напівпровіднику. Якщо в МДН-структурі досягається стан збагачення і інверсії, то N можна визначити по значенням C_{max} C_{min} і електрофізичним константам, характерним для кожного напівпровідника при заданій температурі, з рішення наступної системи рівнянь:

$$C_{min} = \frac{1}{\frac{1}{C_{max}} + \frac{1}{S} \sqrt{\frac{2\varphi_T(Y_L - 1,75)}{q\epsilon_S N}}} \quad (2.3)$$

$$\left(\frac{n_i}{N}\right)^2 e^{Y_L} = Y_L - 1 \quad (2.4)$$

де Y_L – поверхневий потенціал початку сильної інверсії, коли заряд неосновних носіїв заряду рівний заряду іонізованих домішок; $\varphi_T = \frac{k_0 T}{q}$ – температурний потенціал.

Дана система рівнянь зводиться до наступного трансцендентного рівняння:

$$\frac{e^{Y_L/4}}{2\sqrt{(Y_L-1,75)}\sqrt{(Y_L-1)}} - \frac{1}{C_0 S(\frac{1}{C_{min}} - \frac{1}{C_{max}})} = 0 \quad (2.5)$$

де $C_0 = \sqrt{\frac{2q\epsilon_s n_i}{\varphi_t}}$ – ємність Дебая для власного напівпровідника. Дане рівняння зазвичай розраховують методом Ньютона або методом простих ітерацій, попередньо перетворивши його до вигляду:

$$Y_L = 4 \ln(2m) + 2 \ln[(Y_L - 1,75)(Y_L - 1)] \quad (2.6)$$

де,

$$m = \frac{1}{C_0 S(\frac{1}{C_{min}} - \frac{1}{C_{max}})} \quad (2.7)$$

проміжна змінна, що включає експериментальні данні і константи. Концентрація носіїв заряду визначається із рівняння:

$$N = \frac{n_i e^{Y_L/2}}{\sqrt{(Y_L-1)}} \quad (2.8)$$

Крім того, концентрацію вільних носіїв можна визначити по наступним наближеним рівнянням:

$$N = (34,08 + 18,35 \ln m) m^2 n \quad (2.9)$$

$$N = 50,5 m^{2,184} n \quad (2.10)$$

2.2.2 Методика визначення основних параметрів діелектрика у складі МДН структури. На МДН-структуру подають напругу зміщення (додатної полярності – для напівпровідника n-типу, від’ємної – для напівпровідника p-типу), достатню для переводу приповерхневого шару напівпровідника в стан сильного збагачення. При цьому ємність МДН-структури стає рівною ємності діелектрика, так як ємність приповерхневого шару напівпровідника $C_{sc} \gg C_0$, де C_0 – питома ємність діелектрика.

При досягненні стану сильного збагачення ємність діелектрика рівна максимальній ємності МДН-структури. Тоді товщина діелектрика при відомій діелектричній проникності визначається по формулі плоского конденсатора:

$$d = \varepsilon_0 S / C_{\max} \quad (2.11)$$

де S – площа металічного електрода.

Якщо товщина діелектрика визначена будь-яким незалежним методом, то діелектрична проникність діелектрика визначається виразом:

$$\varepsilon_D = \frac{C_{\max} d}{\varepsilon_0 S} \quad (2.12)$$

2.2.3. Методика визначення основних параметрів межі поділу діелектрик-напівпровідник в МДН структурах. Один з найбільш загальних прийомів визначення параметрів МДН-структур полягає у співставленні ідеальної розрахованої C - V кривої з експериментальною залежністю ємності від напруги.

Цей метод вперше був застосований Терманом. Спочатку вимірюється ємність на високих частотах ($\omega \gg 1$), внаслідок чого знаходиться рівняння для ємності, не пов'язане з поверхневими станами. Ця частина високочастотної характеристики показана на рис.2.1 (пунктирна лінія) для напівпровідників n - та p -типу.

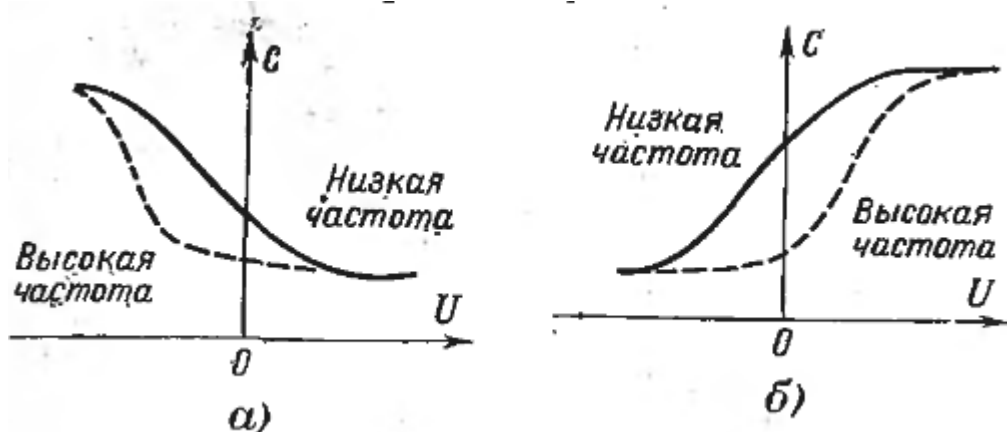


Рисунок 2.1 – Високочастотні та низькочастотні вольт-фарадні характеристики для напівпровідника p -типу (а) та n -типу (б)

Вплив поверхневих станів на напругу призводить до зміщення ідеальних МДН-кривих вздовж осі напруг. Це відбувається внаслідок того, що при наявності поверхневих станів електричне поле в окислі стає більшим,

ніж поле на поверхні напівпровідника, при цьому необхідно прикласти більший заряд до металу для того, щоб отримати задане поле на поверхні напівпровідника. Порівнюючи криву на рис.2.1 з ідеальною МДН-кривою, можна визначити залежність зміщення ΔC від U . Повний заряд поверхневих станів Q_{ss} для заданого значення поверхневого потенціалу визначається наступним рівнянням:

$$Q_{ss} = C_i(\Delta U) \quad (2.13)$$

Ефективна густина початкового заряду в МДН-структурі визначається по співвідношенню:

$$N_{S0} = \frac{C_0}{q} V_{FB} \quad (2.14)$$

де $C_0 = C_{\max} / S$ – питома ємність діелектрика. Умова плоских зон контролюється по досягненні ємності плоских зон C_{FB} , яку можна розрахувати, якщо відомі ємність діелектрика і концентрація вільних носіїв заряду в напівпровіднику:

$$C_{FB} = \frac{1}{\frac{1}{C_{\max}} + \frac{1}{(C_{SFB}S)}} \quad (2.15)$$

де $C_{SFB} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N}{V_T}}$ – ємність напівпровідника за умови плоских зон.

Так як N в ряді випадків можна визначити з ВЧ C - V характеристики по значенням C_{\max} та C_{\min} , отримуємо:

$$C_{FB} = \frac{1}{\frac{A}{C_{\min}} + \frac{1-A}{C_{\max}}} \quad (2.16)$$

де $A = \sqrt{\frac{2}{34,08 + 18,35 \ln m}}$ – множник, доволі слабо залежний від величини m . Його завжди можна замінити з невеликою похибкою сталої величини для певного класу досліджуваних структур.

Щоб отримати інформацію про вклад різних механізмів утворення заряду в вимірний поверхневий заряд, необхідно, враховуючи специфіку кожного заряду, провести додаткові вимірювання. Рухомий заряд і його участь у формуванні поверхневого заряду в напівпровіднику зазвичай визначають за допомогою так

званих термо-польових циклів. Після вимірювання поверхневого заряду МДН-структура піддається нагріву з прикладенням електричного зміщення. Охолодження МДН-структури до кімнатної температури роблять в присутності електричного поля. При досягненні кімнатної температури знову відбувається визначення поверхневого заряду.

Визначення спектру густини поверхневих станів з високочастотних C-V характеристик полягає у порівнянні виміряної ВЧ C-V залежності і теоретично розрахованої для ідеальної МДН-структури без поверхневих станів. При цьому спектр густини станів визначається за наступним співвідношенням:

$$N_{ss}(\varphi_s) = \frac{C_0}{q} \frac{d}{d\varphi_s} (\Delta V) \quad (2.17)$$

де $\Delta V = V - V_T$ – зсув експериментальної ВЧ C-V кривої відносно теоретично розрахованої ідеальної C-V кривої.

Перетворюємо попередній вираз до вигляду:

$$N_{ss}(\varphi_{ss}) = \frac{C_0}{q} \frac{dV_T}{dV_s} \left(\frac{K_T}{K} - 1 \right) \quad (2.18)$$

де $K_T = \frac{dC}{dV_T}$, $K = \frac{dC}{dV}$ – тангенси кута нахилу дотичної до теоретичної кривої.

На основі попередньої формули можна отримати співвідношення для розрахунку поверхневих станів, енергетичне положення яких відповідає рівню Фермі за умови плоских зон і середині забороненої зони напівпровідника.

$$N_{SS(FB)} = \frac{C_{max}^2}{qS(C_{max}-C_{FB})} \left[\frac{C_{FB}(C_{max}-C_{FB})^2}{3V_T C_{max}^2} \frac{1}{K_{FB}} - 1 \right] \quad (2.19)$$

$$N_{SS(i)} = \frac{C_{max}^2}{qS(C_{max}-C_{FB})} \left[\frac{C_i^3}{V_T (C_{SFB}S)^2} \frac{1}{K_i} - 1 \right] \quad (2.20)$$

де $K_{FB} = \left(\frac{dC}{dV} \right)_{C_{FB}}$; $K_i = \left(\frac{dC}{dV} \right)_{C_i}$ – тангенси кута нахилу до C-V кривої в точках C_{FB} та C_i ; C_i – ємність МДН-структури, коли поверхневий потенціал співпадає з серединою забороненої зони напівпровідника.

Вимірювання при різних (в тому числі і при достатньо низьких) частотах дозволяють визначити постійні часу поверхневих станів. Диференціальний метод

застосовується при дослідженні МДН-структур з високою густиною поверхневих станів. До переваг даного методу відносять його простоту та відсутність потреби у громіздких обчисленнях, а до недоліків відносять те, що вимірюється лише інтегральна величина N_{SS} і мається невизначеність у величині ємності збідненого шару напівпровідника, що робить цей метод ненадійним [23].

3. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕЖІ ПОДІЛУ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВІ НАНОКРЕМНІЮ

3.1 Технологія синтезу, структура та хімічний склад нанокремнію.

Тонкі плівки нанокремнію наносились методом ВЧ магнетронного розпилення. Технологія синтезу експериментальних зразків містила наступні етапи: очищення підкладинок, осадження плівки нанокремнію, формування контактних майданчиків, поділ підкладинки на окремі зразки, припаювання виводів.

В якості підкладинок були використані пластини монокристалічного кремнію електронного типу провідності марок КЕФ 10/0,1 та КЕФ 4,5/0,1.

Очищення кремнієвих підкладинок полягає у хімічному видаленні органічних та неорганічних забруднювачів, а також плівки природного оксиду з поверхні пластин. Для очищення підкладинок від забруднювачів послідовно використовувались 2 розчини: перекисно-аміачний ($\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_3:\text{H}_2\text{O}=1:1:3$) та перекисно-хлорний ($\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} = 1:1:3$) розчини. Кожний з цих травників нагрівався до температури 80°C , після чого кремнієві пластини поміщались спочатку у перекисно-аміачний, а тоді у перекисно-хлорний розчини. Тривалість обробки у кожному розчині становила 10 хв. Після кожної стадії очищення проводилось промивання пластин в трьохкаскадній ванні з деіонізованої води різної температури (60 , 40 та 20°C) та просушування на центрифугі. Далі кремнієві пластини оброблялись у розчині плавикової кислоти ($\text{HF}:\text{H}_2\text{O} = 1:10$) з метою видалення окисної плівки з поверхні кремнію.

Метод іонного розпилення полягає у видаленні частинок матеріалу мішені шляхом бомбардування останньої прискореними іонами, які генеруються у тліючому розряді, та наступному осадженні цих частинок у вигляді тонкої плівки на підкладинці. Для нанесення плівок нанокремнію використовують різновид методу іонного розпилення – високочастотне реактивне магнетронне розпилення. Особливістю такого різновиду іонного розпилення є наявність в області поблизу

катоду схрещених електричного та магнітного полів. Це забезпечує циклоїдні траєкторії руху електронів, тобто створення для електронів своєрідної пастки в області катоду, в результаті чого зростає концентрація іонів, а отже, інтенсивність бомбардування ними мішені.

В даній роботі синтез нанокремнію здійснювався на технологічній установці ВУП-5, яка була модернізована шляхом введення до її складу магнетрону. Процес розпилення мішені відбувався в середовищі аргону на частоті 27 МГц. З метою підвищення хімічної чистоти одержаних експериментальних зразків у вакуумній камері ВУП-5 здійснювалось попереднє розпилення титану, що дало змогу зменшити тиск залишкових газів камери на порядок. При цьому технологічні параметри синтезу були наступними: $T_{oc} = 130...280^{\circ}\text{C}$, $t_{oc} = 8...10$ хв, $U_a = 600...800$ В; $I_c = 25$ мА; $I_a = 100...120$ мА; $P = (2-3) \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. Технологічна карта дослідних зразків наведена у табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Технологічна карта синтезу варікапів на основі nc-SiO_x

№ зразку	марка підкладинки	T _{oc} , °C	t _{oc} , хВ
3-1-8	КЕФ-10	180	10
3-1-9	КЕФ-4,5		
3-2-8	КЕФ-10	200	
3-2-9	КЕФ-4,5		
3-3-8	КЕФ-10	240	
3-3-9	КЕФ-4,5		
3-8-8	КЕФ-10	250	
3-8-9	КЕФ-4,5		
3-5-8	КЕФ-10	280	
3-5-9	КЕФ-4,5		
3-6-8	КЕФ-10	130	
3-6-9	КЕФ-4,5		
3-4-12	КЕФ-10	280	8
3-4-9	КЕФ-4,5		
3-7-8	КЕФ-10	130	
3-7-9	КЕФ-4,5		

Товщина плівок визначалась на основі даних Оже-електронної спектроскопії і лежала в межах 100...120 нм в залежності від умов отримання.

Через відмінність у величині ширини забороненої зони плівки нанокремнію і монокристалічної кремнієвої підкладки у місці їх контакту утворюється гетероперехід. Структура експериментальних зразків наведена на рис. 3.1.

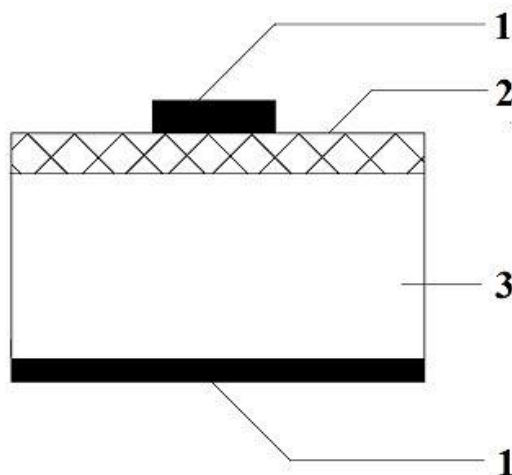


Рисунок 3.1 – Структура фотоварікапа:

1 – металеві контакти Ti – Ni, 2 – плівка nc-SiO_x, 3 – кремнієва підкладка

Нанесення Ti-Ni металізації на фронтальну та тильну поверхню зразків здійснювалось на установці ВУП-5 методом електронно-променевого випаровування. Осадження фронтальних металевих контактів здійснювалось через спеціально підготовлену маску з фольги, яка містила періодично розташовані отвори площею 2 мм². Така мала площа контактів забезпечує мінімальне затінення фотоактивної поверхні варікапа. Товщина буферного шару Ti становила 30 нм, а верхнього провідного шару Ni – 350 нм. Параметри осадження нижнього/верхнього шару: струм емісії 140/200 мА, прискорююча напруга 12 кВ, температура підкладки 200/100°C, час осадження 2/10 хв.

Процес виготовлення експериментальних зразків завершувався різкою пластин на скрайбері “Алмаз” та припаюванням виводів на паяльній станції LUKEY-701.

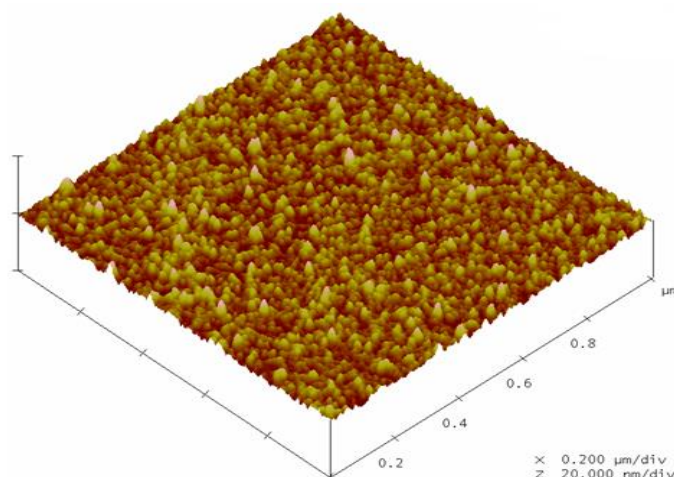


Рисунок 3.2 – АСМ-зображення поверхні нанокремнію

Структурні дослідження поверхні нанокремнію здійснювались за допомогою двох методів: методом атомно-силової мікроскопії (АСМ, мікроскоп NanoScope IIIa Quadrexed Dimension 3000) та методом скануючої електронної мікроскопії (СЕМ, мікроскоп Jeol Superprobe 733). АСМ та СЕМ знімки поверхні нанокремнію наведені на рис.3.2 та 3.3.

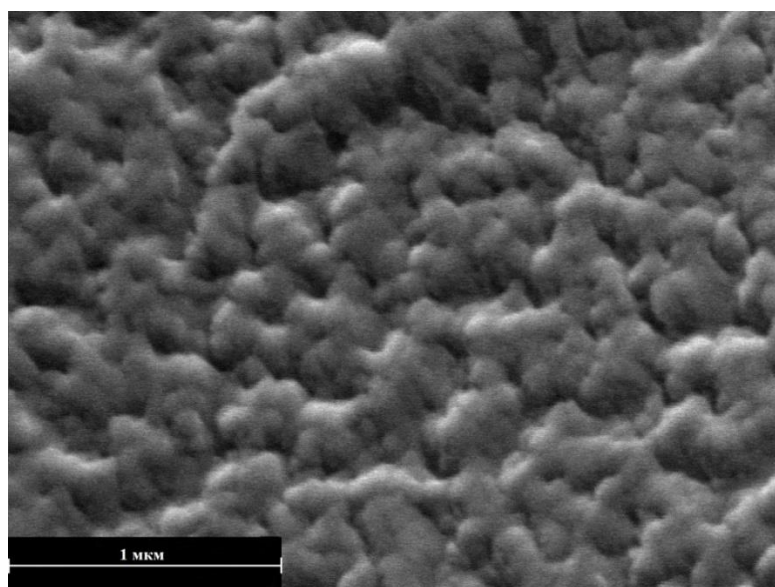


Рисунок 3.3 – СЕМ знімок поверхні нанокремнію

З рис. 3.2 та 3.3 видно, що поверхня плівки складається із зерен розміром близько 100 нм, що рівномірно розподілені по поверхні. Одержані результати морфологічних досліджень дають змогу ідентифікувати на поверхні плівки

наявність структурних одиниць (зерен) розміром нанометрового діапазону, що свідчить про синтез кремнієвої плівки зернистої (нанокристалічної) будови.

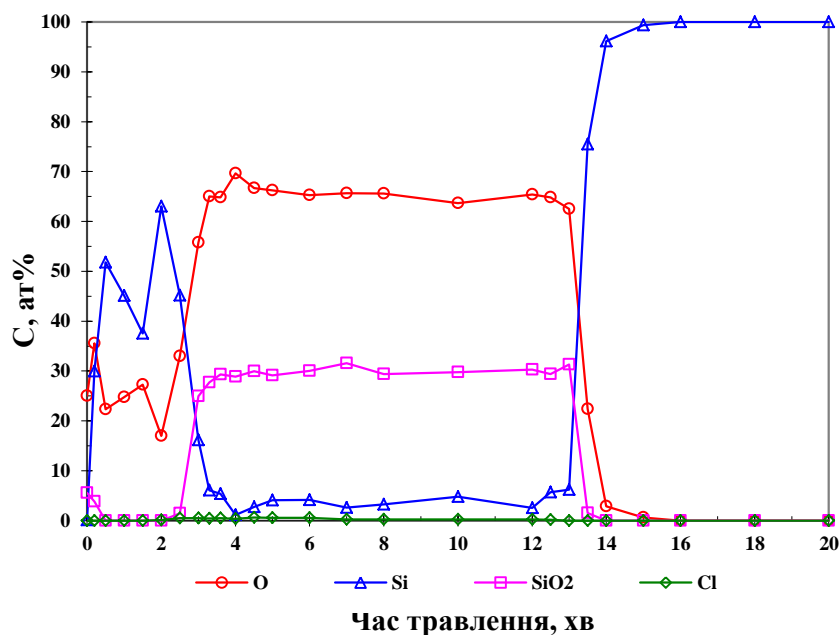


Рисунок 3.4 – Профіль розподілу хімічних елементів у складі плівки нанокремнію

Хімічний склад плівок нанокремнію вивчався методом Оже-електронної спектроскопії за допомогою спектрометра LAS-2000 Riber (рис.3.4). Даний метод дає можливість вивчення розподілу хімічних елементів по глибині плівки. Для цього поверхня експериментальних зразків підлягала бомбардуванню іонами аргону з енергією 4 кеВ. Швидкість травлення становила 30 Å/хв.

Даний аналіз встановив наявність у складі плівки кисню у значній кількості від 20 до 30 ат. %. Однак даний метод не дає інформації про тип хімічних зв'язків кисню у плівці нанокремнію, тому синтезовані плівки позначаються як nc-SiO_x.

3.2 Аналіз вольт-фарадних характеристик гетероструктур на основі нанокремнію

Вимірювання вольт-фарадних характеристик (ВФХ) виконувалися за допомогою вимірювальної установки, схема якої зображена на рис 3.5.

В даній схемі U – джерело напруги змінної полярності Б1-7, ДС – джерело світла (для проведення вимірювання світлових ВФХ), V – цифровий вольтметр В7-16А. Вимірювання проводилися за допомогою Q - вимірювача добротності ВМ 650, до складу якого входили: генератор частоти, C_k – змінна ємність вимірювального контуру та L_k – індуктивність вимірювального контуру, які забезпечують можливість вимірювання ємності зразків. $L_{др}$ – дросель, необхідний для нівелювання вкладу опорів компонентів контуру, $C_{бл}$ – блокуюча ємність, необхідна для зниження впливу різних приладів на вимірювальну установку, і яка забезпечує повторюваність результатів, $R_{об}$ – обмежувальний резистор, що використовується для збереження цілісності зразків, обмежуючи електричний струм.

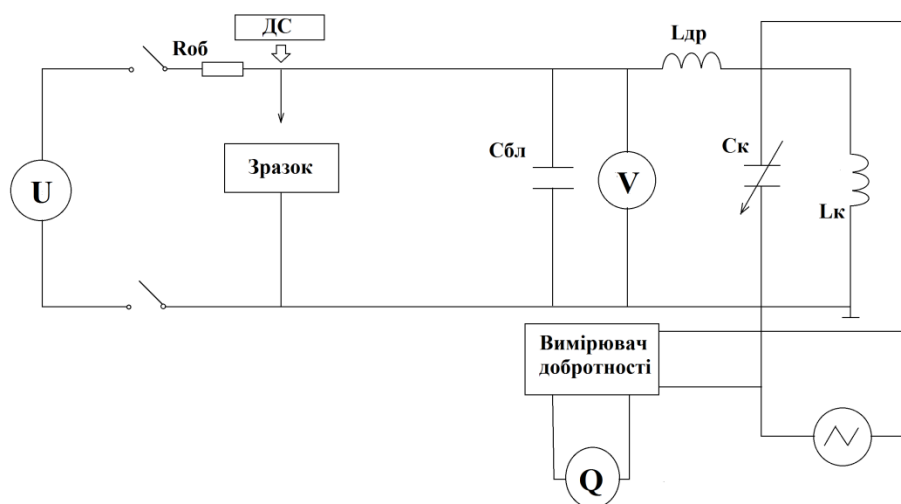


Рисунок 3.5 – Експериментальна схема вимірювання ВФХ

Темновий режим вимірювання забезпечувався шляхом закриття дослідного зразку світлонепроникним екраном.

Методика проведення вимірювання ємності зразків за участі вимірювача добротності ВМ 650 включає в себе:

1. Вибір частоти вимірювання ємності.
2. Налаштування вимірювального контуру в резонанс і зняття виміряного значення його ємності C_1 (без досліджуваного зразку).

3. Розміщення на робочому столику експериментального зразку.
4. Налаштування вимірювального контур в резонанс і зняття вимірюваного значення ємності C_2 (з досліджуваним зразком).
5. Визначення ємності досліджуваного зразку за формулою:

$$C_x = C_1 - C_2 \quad (3.1)$$

В роботі були виміряні темнові вольт-фарадні характеристики гетеропереходів на основі нанокремнію в залежності від частоти тестового сигналу, що змінювалась в межах від 110 кГц до 2,5 МГц.

Виміряні ВФХ аналізувалися в залежності від умов експерименту (частота тестового сигналу f) та технологічних режимів синтезу нанокремнію (температури осадження T_{oc} , часу осадження t_{oc} і типу підкладки).

При зростанні частоти тестового сигналу має місце зменшення величини ємності МДН структури, що пояснюється тим, що заряд, захоплений на поверхневих станах не встигає слідувати за змінами напруги (рис.3.6)

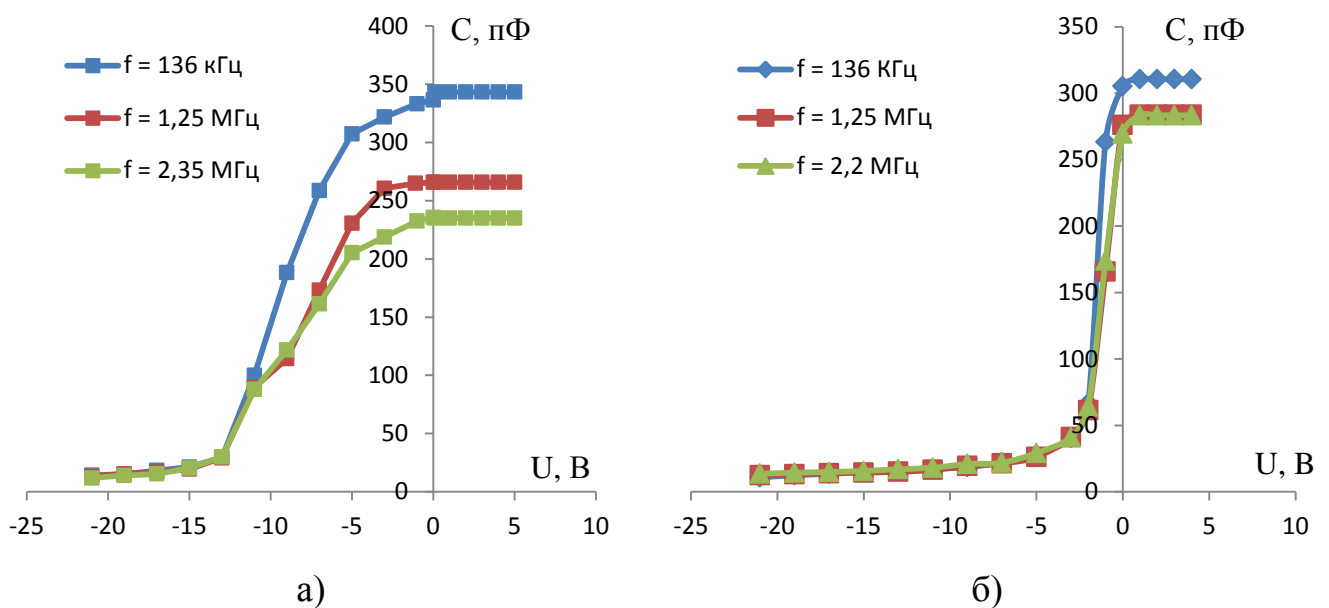


Рисунок 3.6 – Вплив частоти тестового сигналу на ВФХ варікапів, синтезованих за температури: 280°C (а) та 130°C (б)

Причому для цих гетероструктур, синтезованих у різних технологічних режимах, спостерігається різна частотна залежність ВФХ. Для ряду експериментальних зразків з ростом частоти ємність структури зменшується лише

в області збагачення основними носіями заряду, як наприклад для гетеропереходу, синтезованого за низької температури осадження ($T_{oc} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$) (рис. 3.6, б).

Частотна залежність ємності структури в області збагачення основними носіями заряду може бути обумовлена частотною дисперсією ϵ . Для ряду інших експериментальних зразків, як правило, синтезованих за вищих температур осадження ($T_{oc} = 280\text{ }^{\circ}\text{C}$) має місце не лише частотна зміна ємності в області збагачення, а і в області збіднення основними носіями (рис. 3.6, а). Це свідчить про більший вміст поверхневих станів на межі поділу, які не встигають слідувати за зміною тестового сигналу.

Тип підкладки здійснює несуттєвий вплив на вольт-фарадні характеристики порівняно з іншими технологічними параметрами.

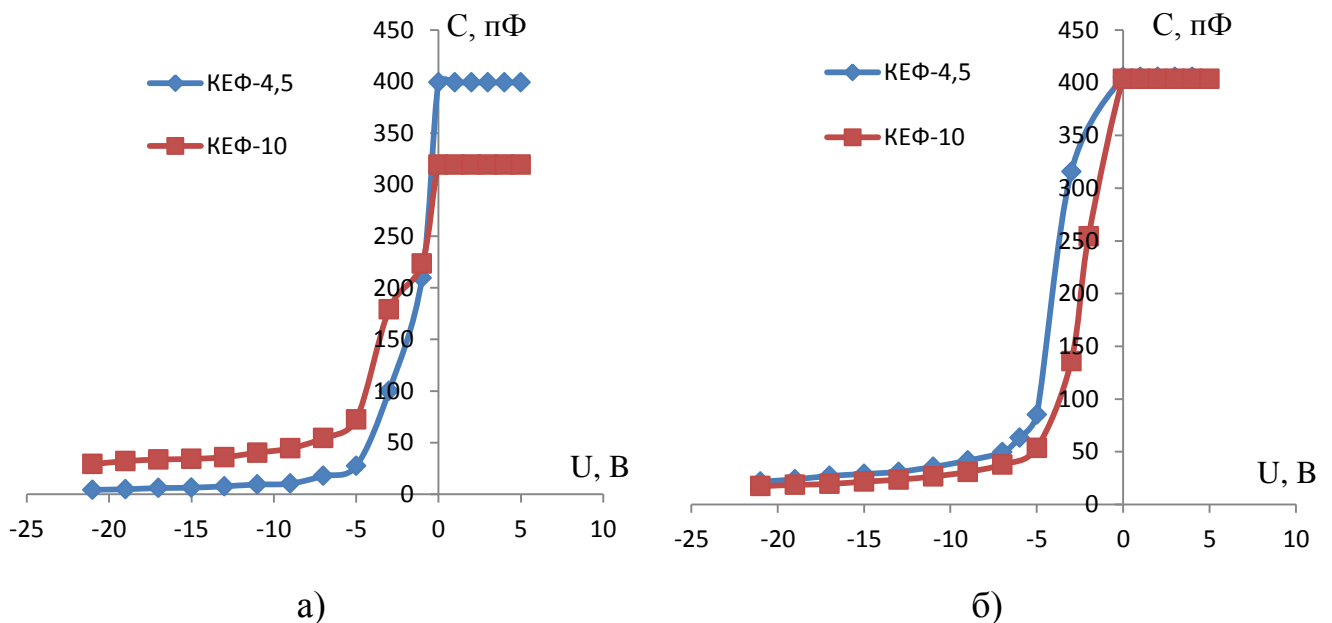


Рисунок 3.7 – Вплив типу підкладки на ВФХ варікапів, синтезованих за температури: 200°C (а) та 280°C (б)

Як видно з наведених графіків на рис.3.7, зміна типу підкладки викликає невеликий зсув ВФХ вздовж осі напруг, що означає зміну вбудованого заряду у плівці нанокремнію, що спостерігається для всіх експериментальних зразків. Однак за температури $T_{oc} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ має місце додаткове стиснення ВФХ вздовж осі

ординат, тобто для таких структур зменшується загальна ємність в області збагачення і збільшується в області збіднення основними носіями заряду.

На відміну від типу підкладинки, час осадження плівки нанокремнію здійснює значний вплив на ВФХ досліджуваних структур.

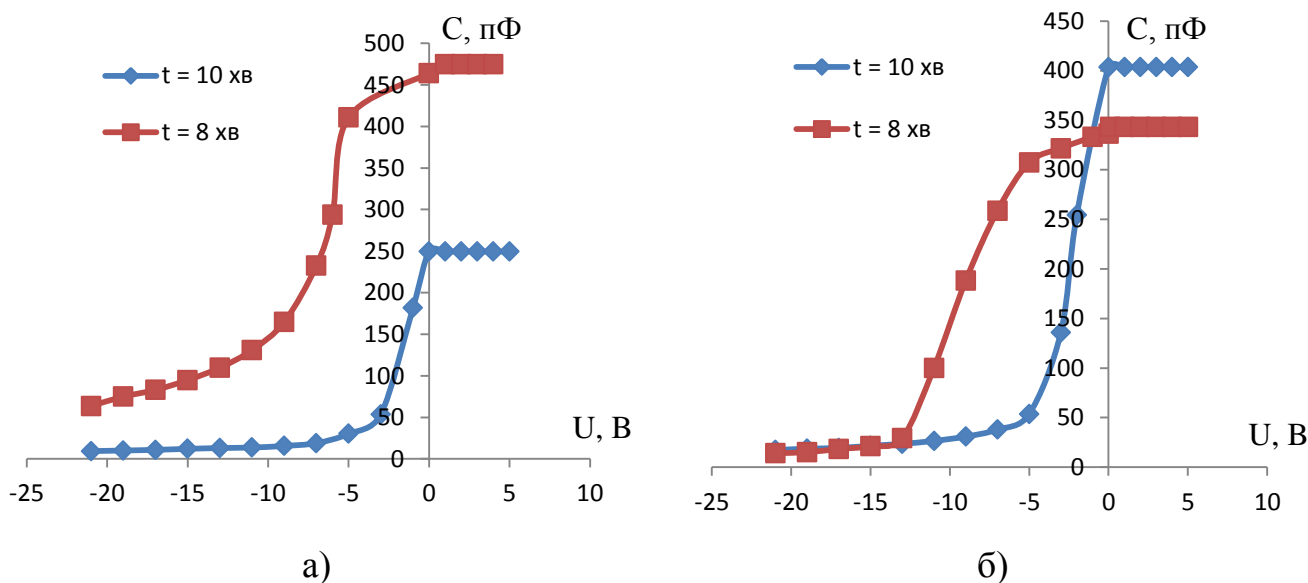


Рисунок 3.8 – Вплив часу осадження на ВФХ варікапів, синтезованих на підкладах: КЕФ-10 (а) та КЕФ-4,5 (б)

Так, зменшення t_{oc} на 2 хв призводить до зсуву ВФХ вздовж осі напруг і зміни нахилу кривої до цієї осі, а також змінюється величина ємності в області збагачення, особливо для структур на підкладках КЕФ-10 (рис.3.8). Слід відмітити, що для більшості технологічних режимів кращу якість межі поділу забезпечує використання зразків з $t_{oc} = 10$ хв.

Температурний режим синтезу гетеропереходів здійснює визначний вплив як на величину вбудованого в плівку заряду, так і на густину поверхневих станів і відносну діелектричну проникність (рис. 3.9).

Як видно з наведених графіків, при зростанні T_{oc} від 130 до 200 °C та 280°C має місце зростання ємності в області збагачення основними носіями заряду, що обумовлено більшим значенням діелектричної проникності плівки нанокремнію. Також при цьому відбувається погіршення межі поділу, тобто зміна куту нахилу

кривої до осі напруг. Слід відмітити, що вказана температурна залежність спостерігається для обох видів підкладинок.

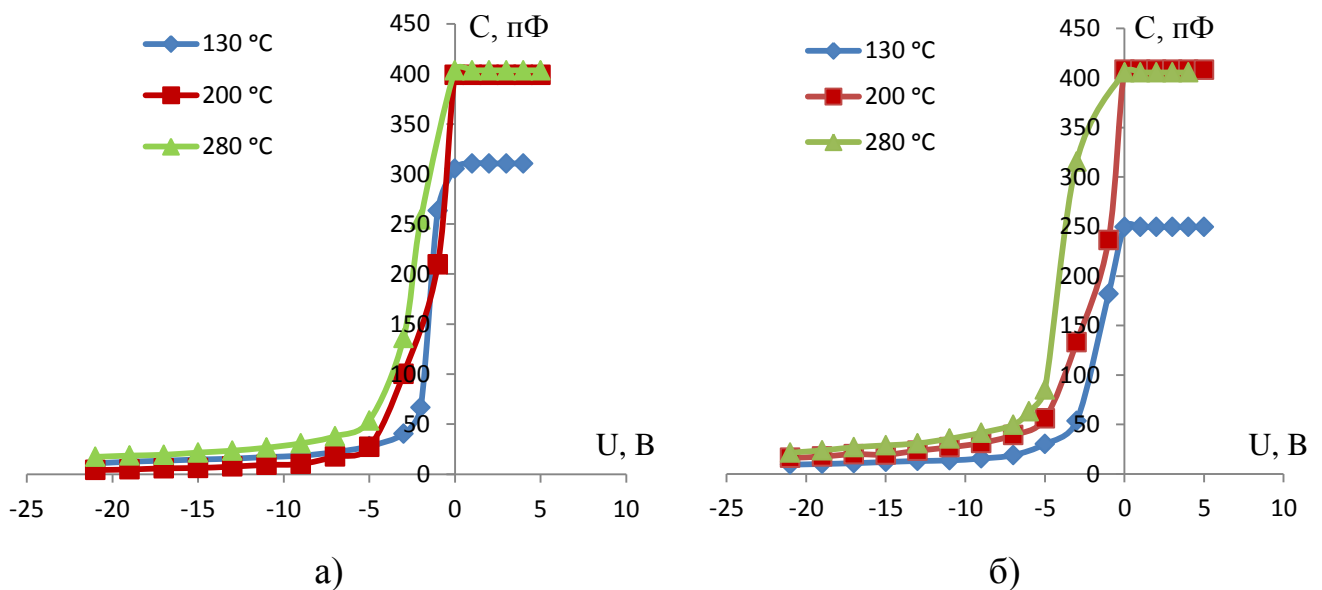


Рисунок 3.9 – Вплив температури осадження на ВФХ варікапів, синтезованих на підкладах: КЕФ-4,5 (а) та КЕФ-10 (б)

З вольт-фарадних характеристик були визначені коефіцієнт перекриття по ємності в темновому режимі K_T та діелектрична проникність плівки нанокремнію ϵ за допомогою формул (3.2, 3.3):

$$K_T = C_{\max} / C_{\min} \quad (3.2),$$

де C_{\max} – максимальна ємність зразку, C_{\min} – мінімальна ємність зразку.

$$\epsilon = C \cdot d / \epsilon_0 \cdot S \quad (3.3),$$

де C – ємність зразку в області збагачення основними носіями заряду, d – товщина діелектрика, ϵ_0 – діелектрична стала, S – площа контакту.

Результати розрахунків занесені до табл. 3.2.

Для досліджуваних зразків спостерігається в цілому зменшення K_T зі зростанням частоти тестового сигналу через те, що зменшується ємність в області збагачення та/або в області збіднення основними носіями заряду, як видно з одержаних ВФХ (рис. 3.6). Це обумовлено або частотною дисперсією ϵ (область збагачення), або тим, що поверхневі стани не встигають перезаряджатися при

зміні тестового сигналу (область збіднення). Як правило, величина зменшення K_T з ростом f становила 20-30 %. Так, за $T_{oc} = 130$ °C для структур на підкладинці КЕФ-4,5 спостерігається зменшення K_T на 25 % з 28,75 (150 кГц) до 21,21 (2,5 МГц) (табл.3.2). В той час для тих же підкладок, однак за $T_{oc} = 280$ °C коефіцієнт перекриття по ємності зменшується вдвічі, при переході від 136 кГц до 2,2 МГц з 23,32 до 11,21 (табл.3.2).

Таблиця 3.2. Електричні параметри варікапів на основі nc-SiO_x

T _{oc} , °C	f, кГц	K _T		ε	
		КЕФ-4,5	КЕФ-10	КЕФ-4,5	КЕФ-10
t _{oc} = 10 хв					
130	150	28,75	29,73	5,85	4,59
	1500	22,74	33,57	6,04	4,17
	2500	21,21	27,01	5,37	4,07
180	150	12,25	-	4,26	-
	1500	9,14		6,14	
	2500	9,62		5,94	
200	136	95,02	25,02	5,74	5,87
	1250	45,56	20,59	6,03	6,01
	2200	39,9	17,2	5,42	5,34
240	136	13,92	-	5,67	-
	1250	6,23		6,02	
	2200	3,88		4,85	
250	120	11,99	-	6,83	-
	1150	7,11		6,98	
	1900	8,07		7,12	
280	136	23,32	18,77	5,80	5,83
	1250	21,51	18,81	6,05	6,06
	2200	11,21	16,94	5,07	5,09
t _{oc} = 8 хв					
130	110	-	7,45	-	6,83
	1200		4,13		6,56
	2000		4,19		6,66
280	136	24,33	-	5,67	-
	1240	20,12		6,12	
	2350	19,91		4,64	

Тип підкладки в цілому здійснює незначний вплив на коефіцієнт перекриття, крім випадку максимального його значення. Так, за $T_{oc} = 200$ °C на

будь-якій частоті має місце зменшення K_T вдвічі при використанні підкладинки КЕФ-10 замість підкладинки КЕФ-4,5. Наприклад, на частоті 136 кГц коефіцієнт перекриття становив 95,02 та 25,02 для пластин КЕФ-4,5 та КЕФ-10 відповідно (табл.3.2). Тому для одержання варікапів з максимальним коефіцієнтом перекриття, слід однозначно використовувати у якості підкладинок кремнієві пластини КЕФ-4,5.

Вплив часу осадження залежить від типу використаної підкладинки. Так, для пластин КЕФ-10 (130 °С) зменшення t_{oc} до 8 хв призвело до різкого зниження K_T в 4 рази (з 29,73 до 7,45) на низькій частоті, та у 7-8 разів (з 33,57 до 4,13) на високій частоті (табл.3.2). Для структур, синтезованих на підкладинці КЕФ-4,5 такого значного зменшення величини K_T при зменшенні часу осадження не спостерігається. Більше того, навіть має місце незначне збільшення K_T , але не більш ніж на 5-8 % (табл.3.2).

Зростання температури осадження призводить до поступового зменшення K_T структур, синтезованих на підкладинці КЕФ-10. Як видно табл.3.2, з ростом температури осадження має місце погіршення K_T від 27,33 (для 130 °С) до 16-18 (при 280 °С). Для структур на підкладинці КЕФ-4,5 спостерігається наступна залежність: за 130 °С коефіцієнт перекриття є більшим, аніж за 280 °С (21-28 і 23-11 відповідно), проте за $T_{oc} = 200$ °С спостерігається максимальне значення K_T , що дорівнює 95. Слід відмітити, що одержане у даній роботі значення K_T є значно більшим, аніж для аналогів (варікапів на основі оксидів рідкоземельних елементів).

Розрахована із ВФХ відносна діелектрична проникність плівки нанокремнію характеризується залежністю від частоти тестового сигналу (рис.3.10), що називається частотною дисперсією даної величини. З наведених кривих видно, що технологічні режими синтезу обумовлюють як величину відносної діелектричної проникності, так і величину зміни ϵ з частотою. З рис.3.10 можна бачити, що для варікапів з температурою осадження плівки нанокремнію близько 130°С величина зміни ϵ з частотою не перевищувала 10%, причому як для часу осадження плівки 8 хв, так і 10 хв. Слід відмітити, що для даної групи зразків

спостерігається монотонна зміна ϵ з частотою. За вищих температур осадження, як правило, частотна дисперсія відносної діелектричної проникності є значно більшою і становить від 20 до 40%. Крім того, для даної групи зразків спостерігається немонотонний характер частотної залежності ϵ з максимумом на частоті в околі 1,2 – 1,5 МГц.

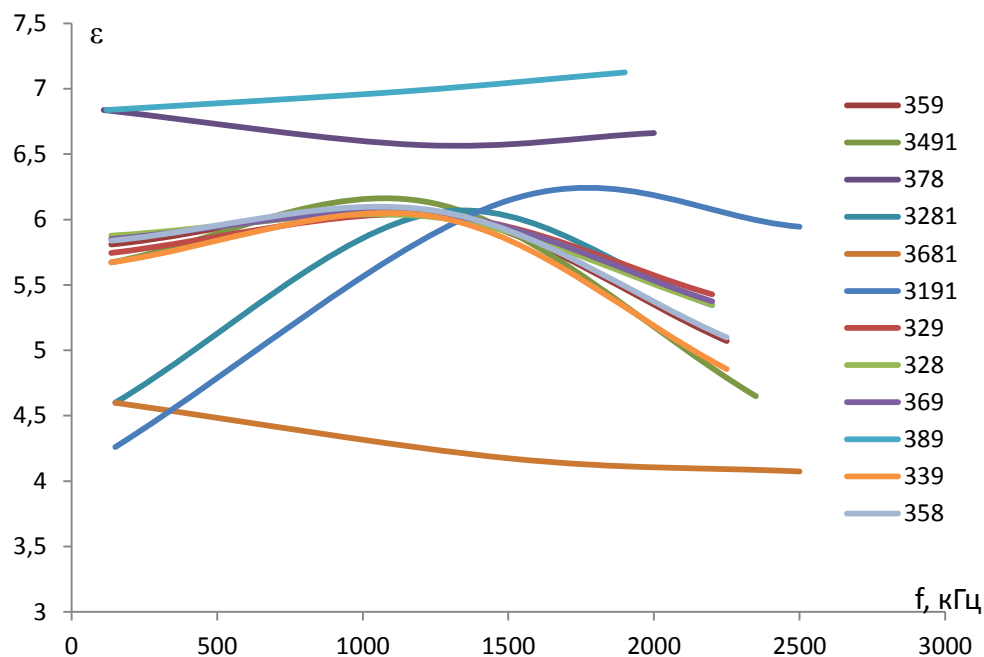


Рисунок 3.10 – Вплив частоти тестового сигналу на ϵ плівок пс-SiO_x, синтезованих в різних технологічних режимах

Тип підкладки на діелектричну проникність ϵ практично не впливає, незалежно від частоти та T_{oc} . Лише за низьких температур осадження (130 °C) має місце суттєве зменшення ϵ при переході від КЕФ-4,5 до КЕФ-10 на 15-20 %. Так, відносна діелектрична проникність змінюється з 5,85 до 4,59 на частоті 150 кГц (табл.3.2).

Час осадження за високих температур (280 °C) не здійснює визначного впливу на діелектричну проникність, в той час як за низьких температур (130 °C) має місце значне підвищення ϵ при підвищенні t_{oc} від 8 до 10 хв. Так, за будь-якої частоти ϵ зростає в середньому на 40 % при зменшенні t_{oc} на 2 хв з 4,09 – 4,59 до 6,56 – 6,83 (табл.3.2).

Температура осадження за будь-якої частоти здійснює наступний вплив на діелектричну проникність: на підкладинці КЕФ-10 при переході від 130 до 180 °С спостерігається збільшення ε з 4,07 – 4,59 до 5,34 – 6,01, а при подальшому підвищенні T_{oc} до 5,09 – 6,06 (табл.3.2).

Максимальне значення діелектричної проникності (6,83 – 7,12) спостерігається для $T_{oc} = 250$ °С, типу підкладинки КЕФ-4,5 і часу осадження 10 хв (табл.3.2). Відомо, що більші значення діелектричної проникності плівок відповідають меншому рівню їх пористості.

3.3. Визначення електрофізичних параметрів межі поділу гетероструктурних варікапів на основі нанокремнію

Оцінка межі поділу одержаних структур на основі нанокремнію проводилась якісно та кількісно. Якісний аналіз здійснювався на основі вимірювань вольт-фарадних характеристик у попередньому розділі, де по зсуву ВФХ вздовж осі напруг було встановлено знак вбудованого у плівку заряду, а також якісно величину густини поверхневих станів за зміною форми ВФХ.

Кількісно оцінка межі поділу одержаних структур на основі нанокремнію проводилась на основі розрахунку густини сумарного заряду межі поділу плівка нанокремнію – монокристалічний кремній, а також величини вбудованого заряду в плівку нанокремнію в залежності від величини питомого опору підкладки, температури осадження, часу осадження та частоти тестового сигналу.

Класифікація зарядового стану системи плівка – підкладинка, а також розрахунок кількості структурних дефектів здійснювався за методикою розрахунку МДН-структур. Завдяки використанню у структурі варікапу високоомної плівки нанокремнію, дана гетероструктура є аналогом структури метал-діелектрик-напівпровідник, в якій роль металу відіграє фронтальний електрод, діелектрика – високоомна плівка нанокремнію, напівпровідника – кремнієва підкладинка. Отже, в даній структурі можна виділити наступні заряди та стани [31]: локалізований в плівці заряд (фіксований чи рухомий); поверхневі

стани межі поділу плівка – підкладинка (швидкі стани); стани в плівці та на її поверхні (повільні стани).

Критерієм розмежування вкладів кожного з цих видів дефектів у вольт-фарадну характеристику є частота зміни тестової напруги. Зокрема відомо, що час релаксації повільних станів становить від 10^{-3} с до кількох хвилин [31]. Іншими словами, на частотах більше 1 кГц повільні стани не встигатимуть перезаряджатись і не вноситимуть свій вклад в ємність структури. В даній роботі вимірювання здійснювались на значно більших частотах, починаючи з 110 кГц, тому внеском станів самої плівки можна знехтувати. Час релаксації швидких станів становить $10^{-4} - 10^{-7}$ с, що означає, що в частотному діапазоні 10 кГц – 10 МГц дані стани встигатимуть слідувати за тестовим сигналом. За більшої частоти тестового сигналу залишається вклад від зарядів плівки.

Слід відмітити, що частота розмежування впливу поверхневих станів та вбудованого у плівку заряду визначається особливостями їх кінетичних характеристик і є різною для різних систем плівка – підкладинка. Так, для класичної системи Si – SiO₂ поверхневі стани, які розташовані в середині забороненої зони кремнію, характеризуються часом релаксації $10^{-4} - 10^{-5}$ с, що відповідає частоті 10^6 Гц та більше. Для поверхневих станів поблизу зони провідності та валентної зони кремнію час релаксації зменшується до $10^{-6} - 10^{-8}$ с і частота розмежування для них збільшується [31].

Для того, щоб визначити частоту розмежування для даної системи було визначено частотну залежність густини сумарного заряду (заряду на поверхневих станах та вбудованого в плівку заряду), який спричиняє зсув напруги плоских зон.

Відомо, що для ідеальної МДН-структури стан плоских зон забезпечується при відсутності напруги на електроді. Для реальної структури, що містить певні структурні дефекти та заряди локалізовані на них, має місце зсув напруги плоских зон вздовж осі напруг. Величину зсуву можна визначити за допомогою рівності (3.4):

$$U_{FB} = \varphi_{ms} - \frac{Q_{\Sigma}}{C_d}, \quad (3.4)$$

де U_{FB} – напруга плоских зон, φ_{ms} – різниця робіт виходу напівпровідника і металу; Q_Σ – сумарний заряд межі плівка – підкладка.

Для напівпровідника n-типу φ_{ms} знаходиться як (3.5):

$$\varphi_{ms} = \varphi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_B \right), \quad (3.5)$$

де φ_m – робота виходу металу; χ – спорідненість напівпровідника до електрону; E_g – ширина забороненої зони напівпровідника; ψ_B – різниця положення рівня Фермі у власному та заданому напівпровіднику; q – елементарний заряд електрону.

Густина сумарного поверхневого заряду розраховується таким чином (3.6):

$$N_\Sigma = \frac{C_d}{q} (U_{FB} - \varphi_{ms}) \quad (3.6)$$

При цьому напругу плоских зон знаходять на основі вольт-фарадних характеристик, а саме: для розрахованого значення ємності плоских зон за формулою (3.1) проводять пряму, паралельну осі абсцис (осі напруг) до перетину з ВФХ, а далі з точки перетину опускають перпендикуляр на вісь напруг. Одержане значення напруги і є напругою плоских зон. Напругу плоских зон розраховано за формулою (3.7):

$$C_{FB} = C_d \cdot \left[1 + \left(\frac{\varphi_T}{2 \cdot \varphi_i} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{C_d}{C_{min}} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (3.7)$$

де φ_T – температурний потенціал; C_{min} – мінімальне значення ємності в області збіднення.

Для визначення величини вбудованого заряду Q необхідно побудувати частотну залежність густину сумарного заряду системи і визначити частоту тестового сигналу, за якої не встигають слідувати поверхневі стани, тобто коли густина поверхневих станів за частот, вищих даної, практично не змінюється. Саме за цієї частоти визначається величина вбудованого заряду. Для цього слід було помножити отриману густину сумарного поверхневого заряду на елементарний заряд.

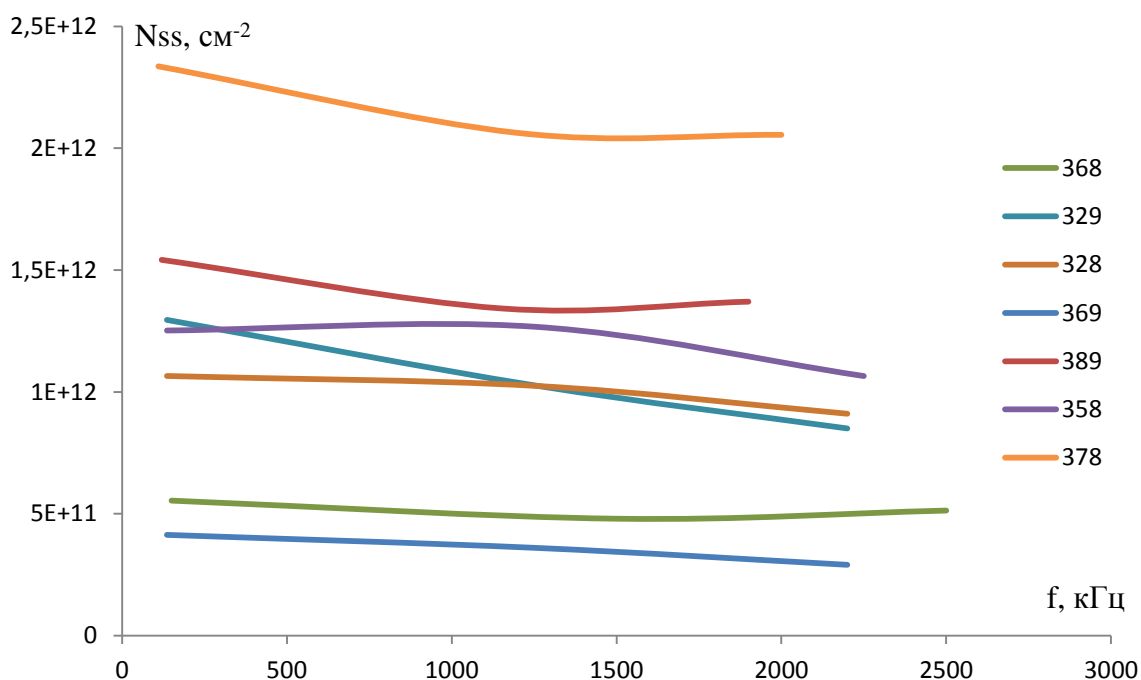


Рисунок 3.11 – Частотна залежність густини сумарного заряду систем плівка-підкладка, синтезованих у різних технологічних режимах

На рис.3.11 зображена залежність густини сумарного заряду системи плівка-підкладка від частоти. З наведених кривих можна побачити, що поверхневі стани не встигають перезарядитися за частоти тестового сигналу 1,2 – 1,5 МГц. Саме за цієї частоти була розрахована величина вбудованого заряду. Слід зазначити, що величина вбудованого заряду лежала в околі $10^{-3} - 10^{-4}$ Кл/м², що приблизно на порядок нижче, ніж для аналогічних систем з Si-SiO₂ [31]. Розраховані значення N_{ss} та Q занесені до табл.3.3.

В роботі був встановлений вплив рівня легування підкладки фосфором на величину вбудованого у плівку нанокремнію заряду. Для осадження нанокремнію використовувались 2 типи підкладки з різним рівнем легування фосфором КЕФ-4,5 і КЕФ-10. Було показано, що незалежно від температури осадження (130, 200 чи 280 °С) спостерігалась чітка залежність Q від величини питомого опору підкладки, а саме: для низькоомної підкладки спостерігається менший вміст вбудованого заряду у плівці нанокремнію, ніж для високоомної плівки за однакових інших технологічних умов синтезу (табл.3.3). Дана закономірність проілюстрована за допомогою діаграм на рис. 3.12.

Таблиця 3.3. Електрофізичні параметри межі поділу варікапів на основі nc-SiO_x

T _{oc} , °C	N _{ss} , см ⁻²		Q, Кл/м ²	
	КЕФ-4,5	КЕФ-10	КЕФ-4,5	КЕФ-10
t _{oc} = 10 хв				
130	4,13 · 10 ¹¹	5,53 · 10 ¹¹	6,6 · 10 ⁻⁴	8,8 · 10 ⁻⁴
	3,60 · 10 ¹¹	4,79 · 10 ¹¹	5,7 · 10 ⁻⁴	7,6 · 10 ⁻⁴
	2,90 · 10 ¹¹	5,13 · 10 ¹¹	4,6 · 10 ⁻⁴	8,2 · 10 ⁻⁴
180	5,13 · 10 ¹¹	-	8,2 · 10 ⁻⁴	-
	1,14 · 10 ¹²		1,78 · 10 ⁻³	
	7,82 · 10 ¹¹		1,25 · 10 ⁻³	
200	1,29 · 10 ¹²	1,06 · 10 ¹²	2,07 · 10 ⁻³	1,70 · 10 ⁻³
	1,02 · 10 ¹²	1,02 · 10 ¹²	1,64 · 10 ⁻³	1,64 · 10 ⁻³
	8,50 · 10 ¹¹	9,10 · 10 ¹¹	1,36 · 10 ⁻³	1,45 · 10 ⁻³
240	1,81 · 10 ¹²	-	2,9 · 10 ⁻³	-
	2,55 · 10 ¹²		4,09 · 10 ⁻³	
	3,43 · 10 ¹¹		5,4 · 10 ⁻⁴	
250	1,54 · 10 ¹²	-	2,46 · 10 ⁻³	-
	1,34 · 10 ¹²		2,14 · 10 ⁻³	
	1,37 · 10 ¹²		2,19 · 10 ⁻³	
280	1,05 · 10 ¹²	1,25 · 10 ¹²	1,68 · 10 ⁻³	2,00 · 10 ⁻³
	1,16 · 10 ¹²	1,26 · 10 ¹²	1,86 · 10 ⁻³	2,02 · 10 ⁻³
	6,38 · 10 ¹¹	1,06 · 10 ¹²	1,02 · 10 ⁻³	1,70 · 10 ⁻³
t _{oc} = 8 хв				
130	-	2,33 · 10 ¹²	-	3,73 · 10 ⁻³
		2,06 · 10 ¹²		3,30 · 10 ⁻³
		2,05 · 10 ¹²		3,28 · 10 ⁻³
280	3,41 · 10 ¹²	-	5,46 · 10 ⁻³	-
	3,71 · 10 ¹²		5,95 · 10 ⁻³	
	2,87 · 10 ¹²		4,59 · 10 ⁻³	

За температури осадження нанокремнію 130 °C спостерігається мінімальна величина вбудованого заряду для підкладки КЕФ-4,5 – $5,4 \cdot 10^{-4}$ Кл/м², яка зростає до $8,6 \cdot 10^{-4}$ Кл/м² при переході до підкладки КЕФ-10. Встановлена залежність може бути обумовлена впливом більшої концентрації фосфору у підкладчинці на видозміну морфології нанокремнію у бік меншої кількості обірваних зв'язків кремнію (меншої концентрації іонів кремнію).

Слід відмітити, що величина зміни вбудованого заряду при цьому однакова, для будь-якої температури осадження (близько $0,2 \cdot 10^{-3}$ Кл/м²). Однакова зміна величини вбудованого заряду при переході від КЕФ-4,5 до КЕФ-10 за будь-якої

температури осадження однозначно говорить про те, що має місце вплив різниці концентрацій фосфору у підкладках, яка є сталою величиною для даних марок кремнію.

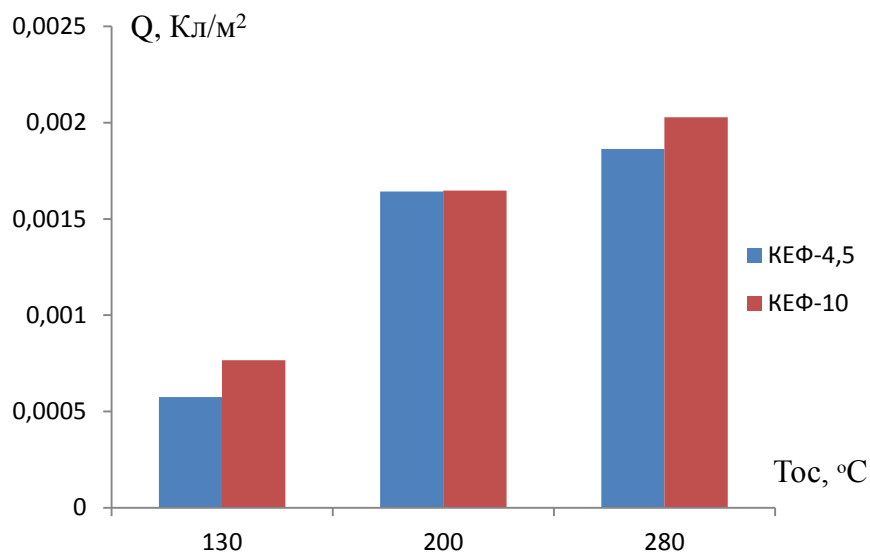


Рисунок 3.12 – Вплив рівня легування підкладки та температури осадження плівки nc-SiOx на величину вбудованого у плівку заряду

Температура осадження плівки нанокремнію здійснює значний вплив на її величину вбудованого заряду. Як видно з наведених діаграм на рис.3.11 та табл. 3.3, мінімальний вміст вбудованого заряду спостерігається за $T_{ос} = 130$ °C (менше $1 \cdot 10^{-3}$ Кл/м²), при підвищенні $T_{ос}$ до 200 °C ця величина зростає в 2 рази і становить $1,6 - 1,8 \cdot 10^{-3}$ Кл/м². При подальшому зростанні $T_{ос}$ до 280 °C величина вбудованого заряду зростає до $1,8 - 2 \cdot 10^{-3}$ Кл/м².

Відомо, що температура осадження здійснює безпосередній вплив на морфологію тонкої плівки. Так, за підвищеної температури одержують, як правило, плівки зернистої структури. Більше того, у роботі [32] було встановлено однозначний зв'язок між ступенем кристалічності кремнієвої плівки та густиною сумарного заряду в гетеропереході на її основі. Чим більша кристалічність плівки, тим більша величина структурних дефектів утворюється в її товщі. Це очевидно обумовлено наявністю великої кількості обірваних зв'язків на поверхні

кристалітів. Тому за значного їх вмісту у товщі має місце зростання величини вбудованого заряду.

Час осадження також здійснював значний вплив на якість плівки нанокремнію. Так, зменшення часу осадження на 2 хв (від 10 до 8 хв) призвело до однозначного погіршення якості тонкої плівки. За абсолютно однакових інших умов експерименту (T_{oc} , тип підкладки, f) величина вбудованого заряду зазнає різкого зростання (в 3-4 рази). За $T_{oc} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ і типу підкладки КЕФ-10 при зменшенні t_{oc} на 2 хв величина вбудованого заряду зросла з $0,76$ до $3,28 \cdot 10^{-3}$ Кл/м², а за $T_{oc} = 280\text{ }^{\circ}\text{C}$ і типу підкладки КЕФ-4,5 – з $1,86$ до $5,95 \cdot 10^{-3}$ Кл/м² (табл.3.3).

Як і для випадку вбудованого заряду, з рис. 3.13 видно, що незалежно від температури осадження (130, 200 та 280 $^{\circ}\text{C}$) спостерігалась чітка залежність N_{ss} від величини питомого опору підкладки, а саме для низькоомної підкладинки спостерігається менша величина густини сумарного заряду, ніж для високоомної пластини (рис.3.13).

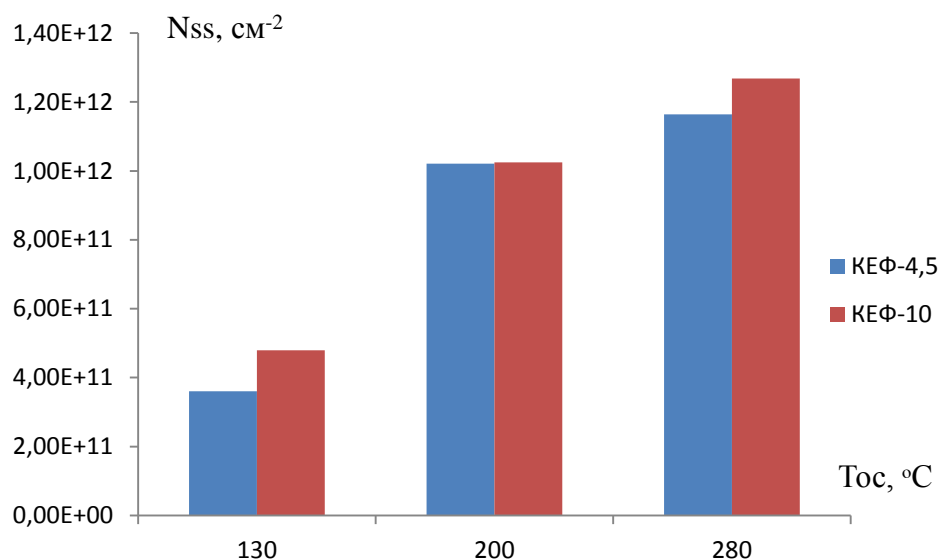


Рисунок 3.13 – Вплив рівня легування підкладинки та температури осадження плівки nc-SiOx на величину густини сумарного заряду в системі плівка-підкладинка

При підвищенні температури осадження з 130 до 200 °C величина густини сумарного заряду збільшується з $3,60 \cdot 10^{11}$ до $1,14 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, а за температури 280 °C – зростає до $1,26 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Зміна типу підкладки з КЕФ-4,5 на КЕФ-10 практично не змінює величину густини заряду, а при зменшенні часу осадження з 10 до 8 хв, N_{ss} зростає на порядок, з $4,79 \cdot 10^{11}$ до $2,06 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Слід зазначити, що одержані розрахунковим шляхом у даній роботі величина густини заряду корелює з даними по N_{ss} , одержаними для подібних структур (nc-SiO_x/c-Si) методом електронно-спінового резонансу [32–34], а саме величина N_{ss} є меншою, аніж 10^{12} см^{-2} , що вважається задовільним рівнем N_{ss} для приладного застосування.

4. ВПЛИВ ЯКОСТІ МЕЖІ ПОДІЛУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОСТРУКТУР ФОТОВАРІКАПІВ НА ОСНОВІ НАНОКРЕМНІЮ

4.1 Аналіз світлових вольт-фарадних характеристик гетероструктур на основі нанокремнію

Схема вимірювання стенду для зняття світлових вольт-фарадних характеристик була такою ж, як і темнових ВФХ (рис.3.5). Додатково до складу вимірювального стенду входив освітлювач. В роботі були використані 2 типи освітлювачів: видимого світла та інфрачервоного (ІЧ). В роботі були виміряні вольт-фарадні характеристики гетеропереходів на основі нанокремнію в залежності від частоти тестового сигналу, що змінювалась в межах від 110 кГц до 2,5 МГц.

Фоточутливість зразків до видимого світла оцінювалась при опроміненні джерелом білого світла. Величина освітленості зразку вимірювалась за допомогою цифрового люксметра LX1010BS. Вимірювання ВФХ здійснювалось при освітленості в межах від 1000 до 5000 лк.

Фоточутливість зразків до ІЧ світла вимірювалась під дією опромінення світлодіодним освітлювачем ближнього ІЧ діапазону. Вибір ІЧ освітлення було здійснено для узгодження зі спектральним положенням максимуму фоточутливості кремнієвого матеріалу. Величина освітленості зразку задавалась струмом через світлодіодний освітлювач і змінювалась в межах 80-1750 Вт/м². Калібрування джерела світла здійснювалось за допомогою вимірювача потужності світлового випромінювання Ezodo-45.

Виміряні світлові вольт-фарадні характеристики аналізувалися в залежності від умов синтезу (t_{oc} , T_{oc} , тип підкладки) та умов експерименту (f та λ). Також досліджувалася залежність ємності структури в області збіднення основними носіями в залежності від рівня світлового сигналу.

Незалежно від умов синтезу гетероструктур і типу освітлення спостерігалась чутливість їх ємності до світла. Як видно з вольт-фарадних

характеристик, наведених на рис. 4.1, в області збіднення основними носіями заряду спостерігається зростання величини ємності структури при подачі світлового сигналу.

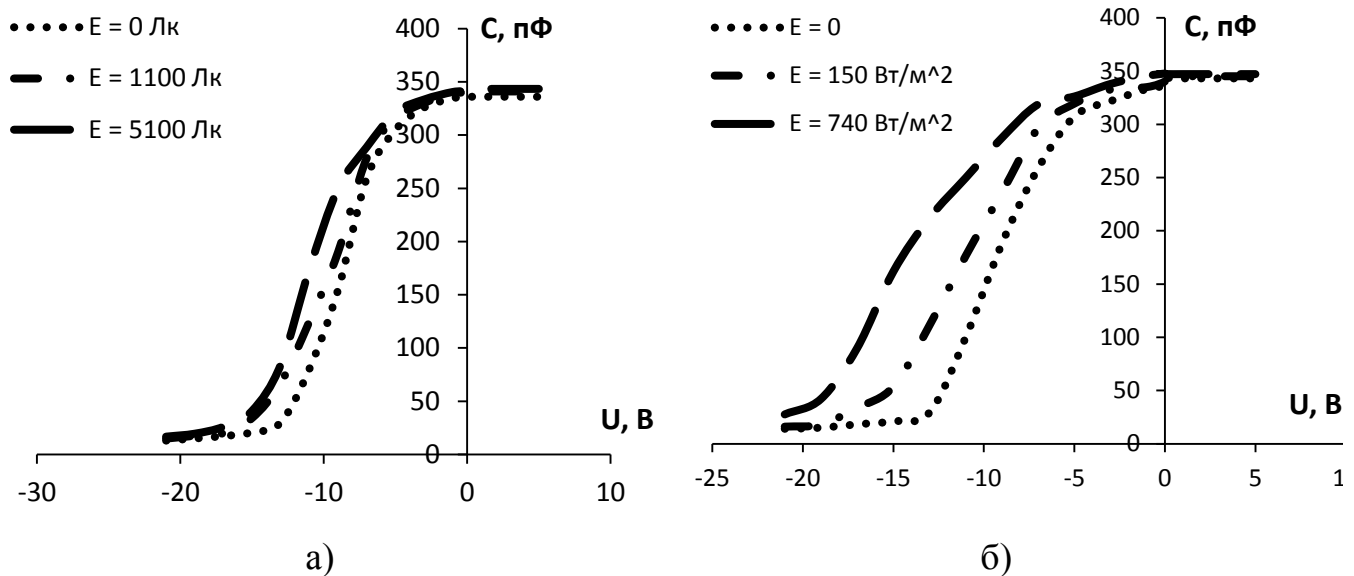


Рисунок 4.1 – Вольт-фарадні характеристики фотодіода при освітленні його білим світлом (а) та ІЧ світлом (б)

Відомо, що збільшення ємності гетероструктури під дією світла обумовлена появою фотоносіїв у приповерхневих областях напівпровідникової підкладки. Для всіх досліджуваних зразків має місце зростання величини ємності фотодіода при збільшенні рівня освітленості від 1000 до 5000 лк (рис. 4.1, а.) та від 150 до 740 Вт /м² (рис.4.1, б).

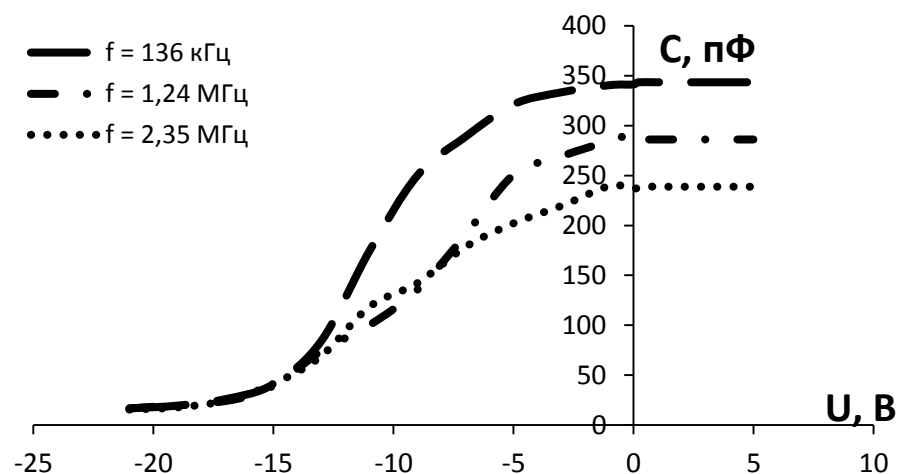


Рисунок 4.2 – Світлові вольт-фарадні характеристики фотодіода в залежності від частоти тестового сигналу

При зростанні частоти тестового сигналу має місце зменшення величини ємності МДН структури, що пояснюється тим, що заряд, захоплений на поверхневих станах не встигає слідувати за змінами напруги (рис.4.2).

Аналіз світлових ВФХ варікапів в залежності від технологічних параметрів показав аналогічні співвідношення між кривими, що й у темновому режимі (рис.3.6-3.9), з тією відмінністю, що величина ємності структури при освітленні збільшується.

Окремо в роботі вивчався вплив довжини хвилі випромінювання та рівня освітленості на величину ємності структури в області збіднення основними носіями заряду.

Як видно з рис.4.1, заміна джерела випромінювання з видимого випромінювання на ІЧ призводить до значно більшого зростання ємності структури в області збіднення основними носіями заряду, що очевидно обумовлено кращим узгодженням енергетичної будови кремнію та ІЧ спектру випромінювання. Тому подальші дослідження проводились саме на цій довжині хвилі.

На рис. 4.3-4.5 наведено залежність ємності структури в області збіднення в залежності від рівня світлового сигналу. Величина напруги при цьому була фіксованою і обиралась для кожного зразку в області максимальної чутливості до падаючого випромінювання.

З наведених рис.4.3-4.5 видно, що залежності фотоємності від рівня освітленості мають практично лінійний характер з незмінним кутом нахилу до осі абсцис в межах однієї кривої, що говорить про наявність одного механізму фоточутливості для даного зразку. Проте слід відмітити, що для окремих режимів синтезу гетероструктур спостерігаються перегини на характеристиках, що говорить про зміну механізму фоточутливості для таких структур. Зокрема зміна механізму фоточутливості структури має місце для високотемпературного режиму синтезу плівки нанокремнію (280°C), який характеризується максимальною кількістю дефектів як на межі поділу плівка-підкладка, так і в самій кремнієвій плівці (рис.4.4). Більше того, цей перегин більш чітко

проявляється для структур, синтезованих на підкладках КЕФ-10, аніж на підкладках КЕФ-4,5 (рис.4.3), що знову ж таки узгоджується з результатами дослідження якості межі поділу, наведеними вище (табл.3.3). І нарешті, використання часу осадження 8 хв також забезпечує появу перегину на кривій залежності ємності структури від рівня світлового сигналу (рис.4.3), що, очевидно, пов'язано з більшою кількістю структурних дефектів на межі поділу плівка-підкладка та у плівці нанокремнію.

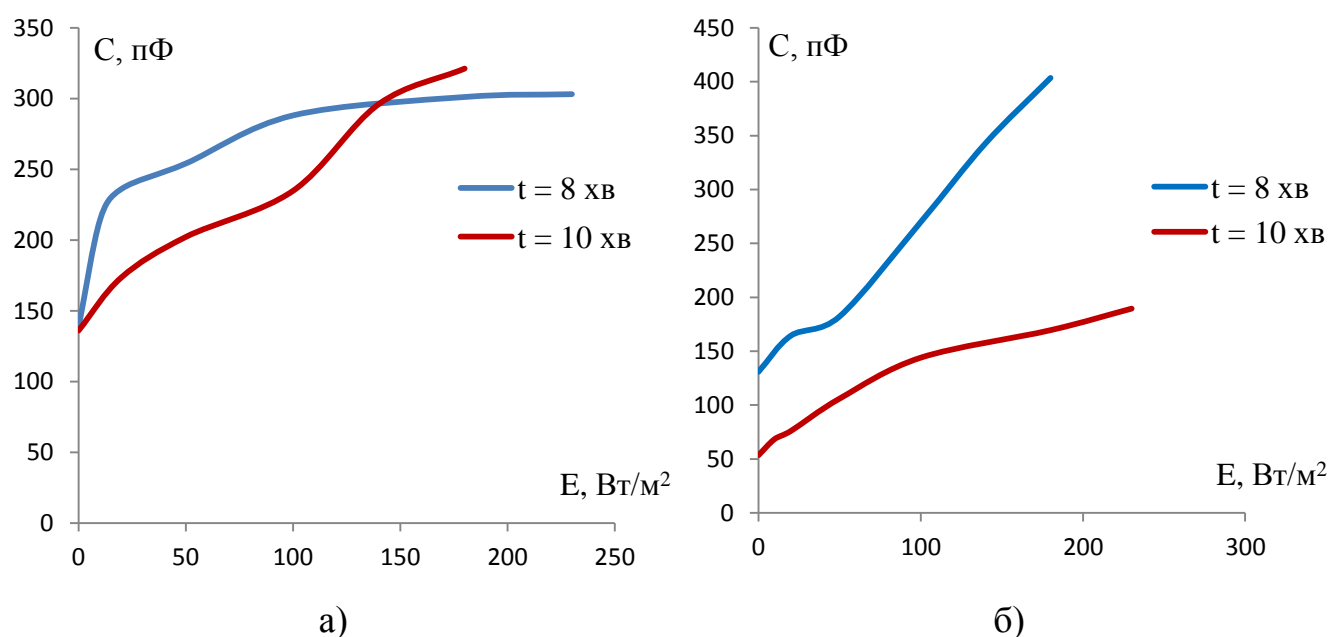


Рисунок 4.3 – Вплив часу осадження плівки нанокремнію на залежність ємності структури від рівня світлового сигналу для підкладок 280 °C (а) та 130 °C (б)

З рис.4.3. видно значний вплив часу осадження плівки нанокремнію на залежність ємності структури від рівня світлового сигналу. Менший час осадження плівки забезпечує структурам, по перше, більшу величину фотоємності майже в усьому діапазоні потужностей світлового сигналу, а по-друге, наявність більш виражених перегинів на кривих. Одержаний результат говорить про те, що структури з більшим вмістом структурних дефектів, які діють як пастки для вільних носіїв заряду, при освітленні містять більшу кількість фотоносіїв за рахунок вивільнення останніх з цих пасток. Однак приріст фотоємності (фоточутливість структури) при зростанні рівня світлового сигналу

більшим є для низькотемпературного режиму синтезу ($130\text{ }^{\circ}\text{C}$) за будь-якого часу осадження. Так, ємність структури зросла для цієї температури синтезу у 4 рази порівняно з темною ємністю, в той час як у високотемпературному режимі синтезу ($280\text{ }^{\circ}\text{C}$) – лише втричі (за будь-якого часу осадження).

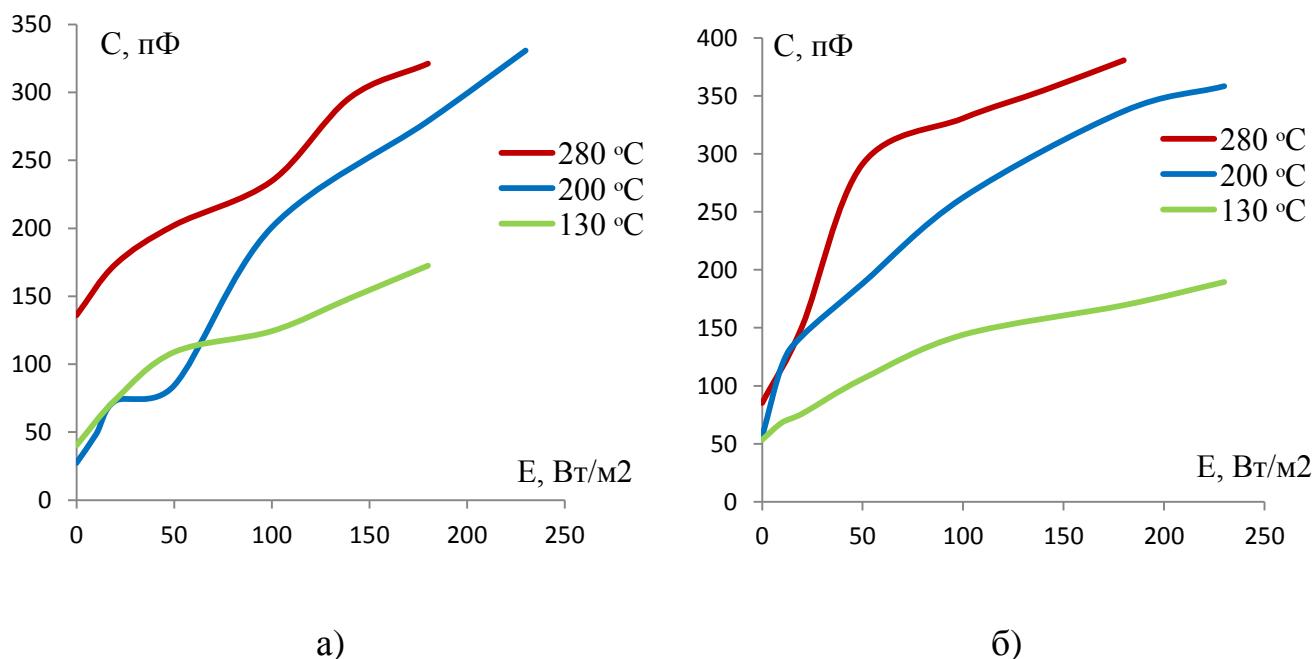


Рисунок 4.4 – Вплив температури осадження плівки пс- SiO_x на залежність ємності структури від рівня світлового сигналу для підкладок КЕФ-4,5 (а) та КЕФ-10 (б)

Більш детально вплив температури осадження можна побачити з рис.4.4, звідки видно, що при зростанні температури синтезу нанокремнію від 130 до $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ для обох типів підкладинок спостерігається зростання загальної величини фотоємності структури. Більш чітко перегини на кривих спостерігаються на кривих, що відповідають високотемпературному режиму синтезу, що узгоджується з попередньо одержаними результатами. Що стосується приросту ємності структури з підвищенням рівня світлового сигналу, то слід відмітити таку особливість: за температури $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ має місце більший приріст ємності (приблизно в 3 рази), аніж за температури синтезу $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ (трохи більше, аніж в 2 рази), однак максимальний приріст ємності спостерігається для проміжної температури осадження в $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (приблизно в 7 разів). Одержаний результат не пов'язаний з

кількістю структурних дефектів у плівці, синтезованої за даної температури. Можливо за даної температури синтезу має місце зміна природи структурних дефектів, однак дане припущення потребує проведення додаткових досліджень. Однак слід відмітити, що саме для цього режиму синтезу спостерігався максимальний коефіцієнт перекриття по ємності у темновому режимі.

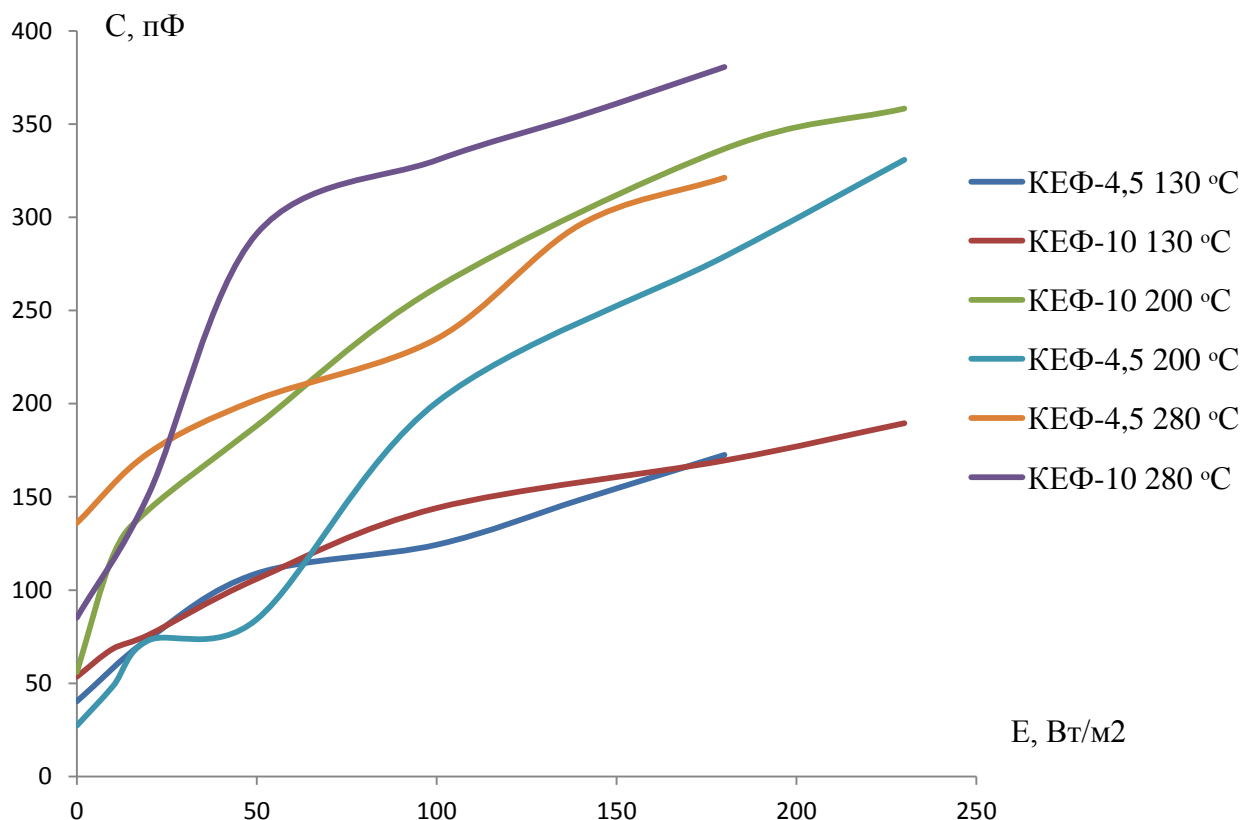


Рисунок 4.5 – Вплив типу підкладки на залежність ємності структури від рівня світлового сигналу для трьох температурних діапазонів

Вплив типу підкладинки на фотоємність структур в різних температурних діапазонах осадження продемонстровано на рис.4.5. З наведених кривих видно, що найменшу фотоємність мають структури, синтезовані за температури 130°C для обох типів підкладинок, а найбільшу – структури, синтезовані за температури 280°C для обох типів підкладинок. Слід відмітити, що за температури осадження 200 та 280°C фотоємність є більшою для структур на підкладинках КЕФ-10, що знову ж таки пов'язано з більшою кількістю структурних дефектів. Однак приріст

ємності при зростанні рівня світлового сигналу є максимальним для температури осадження 200°C та підкладинки КЕФ-4,5.

4.2. Визначення фоточутливих параметрів гетероструктурних фотоварікапів на основі нанокремнію

З світлових ВФХ були визначенні коефіцієнт перекриття по ємності в світловому режимі $K_{\text{св}}$ та величина приросту фотоємності при зміні світлового сигналу від 0 до 5000 лк при освітленні видим світлом та від 0 до 1750 Вт/м² при освітленні ІЧ випромінюванням ($\delta_{\text{св}}$), що розраховувалися за формулами:

$$K_{\text{св}} = \frac{C_{\text{max}}}{C_{\text{min}}} \quad (4.1),$$

де C_{max} і C_{min} – максимальна і мінімальна ємності зразка відповідно

$$\delta_{\text{св}} = \frac{C_{\text{св}} - C_{\text{т}}}{C_{\text{т}}} * 100\% \quad (4.2),$$

де $C_{\text{св}}$ та $C_{\text{т}}$ – ємності в світловому і темновому режимах відповідно. Розраховані показники фоточутливості варікапів були занесені до табл.4.1.

З ростом частоти тестового сигналу $K_{\text{св}}$ абсолютно для всіх зразків зменшується, незалежно від типу освітлювача (табл.4.1). Величина відносної зміни фотоємності зразків, в свою чергу, також знижується з підвищенням частоти. Такі ж частотні залежності спостерігались для електричних параметрів варікапів, що пов'язують з частотною дисперсією відносної діелектричної проникності та/або з тим, що заряд, захоплений на поверхневих станах не встигає слідувати за змінами напруги.

Проаналізувавши дані з таблиці видно, що для всіх зразків, незалежно від джерела освітлення, при підвищенні інтенсивності світла спостерігається зменшення світлового коефіцієнту перекриття по ємності $K_{\text{св}}$. Це пояснюється тим, що при освітленні кількість носіїв заряду у підкладці зростає, а отже зростає і ємність в області збіднення, в той час як в області збагачення ємність структури практично не змінюється, що призводить до зменшення коефіцієнту перекриття (рис.4.1). Величина фоточутливості зразків, навпаки, послідовно зростала з

ростом рівня освітленості, оскільки поступово зростала кількість фотоносіїв, що генерувались під дією лампи освітлення (рис.4.3-4.5).

Таблиця 4.1 Показники фоточутливості варікапів на основі плівок пс-SiO_x

Т _{ос} , °С	Тип підкладки	f, кГц	Видиме випромінювання			ІЧ випромінювання		
			К _{св1000}	К _{св5000}	δ, %	К _{св150}	К _{св740}	δ, %
t _{ос} = 10 хв								
130	КЕФ-10	150	21,21	21,35	56,31	30,9	28,37	214,9
		1500	20,86	19,12	59,07	29,7	25,35	160,32
		2500	9,79	9,2	39,82	5,37	4,07	144,27
130	КЕФ-4,5	136	-			25,28	21,26	210,70
		1250				20,44	19,97	197,52
		2200				20,3	19,81	120,54
180	КЕФ-4,5	150	5,66	6,06	87,62	11,42	10,26	214,22
		1500	9,98	9,62	55,00	9,14	8,56	67,71
		2500	9,55	8,16	49,69	9,62	7,82	59,75
200	КЕФ-4,5	136	-			79,82	59,56	635,10
		1250				43,21	37,42	259,60
		2200				34,68	32,84	297,79
200	КЕФ-10	136	10,7	10,35	92,45	10,78	10,31	259,05
		1250	14,64	14,15	101,97	14,75	13,78	202,09
		2200	13,19	12,48	74,16	13,55	12,58	185,96
240	КЕФ-4,5	136	-			9,99	4,75	195,45
		1250				5,81	3,78	92,83
		2200				2,57	2,17	89,91
250	КЕФ-4,5	120	-			11,99	9,18	317,16
		1150				7,11	6,36	180,75
		1900				8,07	7,29	166,20
280	КЕФ-4,5	136	-			21,58	19,98	72,64
		1250				25,03	23,23	66,54
		2250				10,94	10,57	49,64
280	КЕФ-10	136	-			17,63	16,09	288,02
		1250				18,48	17,48	255
		2200				10,73	14,63	143,45
t _{ос} = 8 хв								
130	КЕФ-10	110	-			7,45	6,54	163,90
		1200				4,13	3,88	60,32
		2000				4,19	4,09	61,49
280	КЕФ-4,5	136	22,88	20,56	180,39	21,43	13,07	621,42
		1240	19,49	18,84	152,72	18,91	13,07	490,73
		2350	17,62	15,4	138,96	15,59	12,37	381,72

Спочатку в роботі були проведені вимірювання ВФХ при освітленні видимим світлом. При цьому були встановлені наступні закономірності. Відносна зміна ємності гетроструктур при освітленні зростає поступово з ростом температури осадження плівки нанокремнію від 59,07 до 180,39% (табл.4.1). Якщо співставити величину фоточутливості з діелектричною проникністю різних зразків (табл.3.2), то можна встановити причину такої залежності. Відомо, що для $nc-SiO_x$ відносна діелектрична проникність є набагато меншою, аніж для $c-Si$ (4-5 та 12-14 відповідно). Така відмінність у ϵ обумовлена високою пористістю плівок нанокремнію.

В даній роботі було встановлено, що зі зростанням Тос нанокремнію, діелектрична проникність плівок зростає, тобто вони характеризуються меншим рівнем пористості, що призводить до покращення характеристик структур на їх основі. Так, фотоварікапи, отримані в високотемпературному режимі характеризуються в 2-3 рази більшою фоточутливістю, аніж їх аналоги, синтезовані у низькотемпературному режимі. Максимальна фоточутливість спостерігалась при Тос 280°C і становила 180,4 %, тобто вихідна ємність збільшилась майже вдвічі при освітленні в 5000 лк (табл.4.1).

З метою одержання більшого фотовідгуку варікапів видиме світло у роботі було замінене на інфрачервоне випромінювання, що краще узгоджується зі спектром фотовідгуку кремнію.

При порівнянні величини фоточутливості зразків, освітлених видимим світлом і ІЧ випромінюванням видно, що для останніх спостерігається значне підвищення зміни фотоємності у 2 – 4 рази. Коефіцієнт перекриття для зразків, що освітлювалися інфрачервоним світлом також, як правило, є вищим, аніж для аналогічних зразків, що освітлювалися звичайним світлом.

Далі в роботі вивчався вплив технологічних параметрів на показники чутливості одержаних варікапів до ІЧ випромінювання. При цьому були встановлені наступні закономірності.

При підвищенні температури осадження підкладки Тос з 130 до 280 °C спостерігається зменшення коефіцієнту перекриття по ємності з 28,37 до 17,48 для

зразків синтезованих на підкладинках КЕФ-10. Для гетероструктур, синтезованих на підкладинках КЕФ-4,5, встановлена закономірність в цілому також виконується, однак максимальне значення світлового коефіцієнта перекриття (до 80) спостерігається для проміжної температури 200 °С. Одержаний результат корелює з електро-фізичними дослідженнями варікапів, для яких саме в цьому технологічному режимі спостерігається максимальний коефіцієнт перекриття по ємності у темновому режимі. Фоточутливість зразків з ростом температури підкладки значно зростає при освітленні ІЧ світлом з 214,9 до 317,16 % на підкладинках КЕФ-4,5 та з 214,9 до 288,02% для підкладок КЕФ-10. Однак максимальний приріст фотоємності при подачі ІЧ випромінювання спостерігався за проміжної температури 200 °С.

Час осадження плівки t_{oc} також впливає на величину коефіцієнта перекриття. Так, при зменшенні t_{oc} на 2 хв (з 10 до 8 хв), значення $K_{св}$ зменшується приблизно в 4 рази, з 28,37 до 6,54 – для зразків з температурою осадження плівки 130 °С, а у випадку високих температур підкладки (280 °С) зменшується не так різко, з 17,48 до 13,07. Величина фоточутливості також зазнає змін внаслідок зменшення часу осадження з 10 до 8 хв. Так, для низькотемпературних зразків δ падає майже втричі, з 160,32 % до 60,32 %, а для високотемпературних зразків навпаки, збільшується в 2 – 2,5 рази, з 317,16 % до 621,42 %.

При зміні типу підкладки зразків з КЕФ-4,5 на КЕФ-10 спостерігається збільшення коефіцієнту перекриття по ємності в світловому режимі з 20,44 до 29,7 при освітленні ІЧ випромінюванням і низьких температурах підкладки. Величина фоточутливості зразків в свою чергу майже не змінюється, маючи значення 210,70% для КЕФ-4,5 і 214,9% для КЕФ-10.

Отже, для синтезу фотоварікапів на основі плівок нанокремнію з максимальною чутливістю до світла слід обрати наступні технологічні режими: температура осадження 200 °С, час осадження 10 хв, тип підкладки КЕФ-4,5.

5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ НА ОСНОВІ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

5.1 Опис ідеї проекту

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Використання нанокремнію в якості діелектричної плівки у варікапах та фотоварікапах.	1. Використання нанокремнію в існуючих приладах замість оксидів рідкоземельних матеріалів.	Покращення стандартного хімічного процесу, спрощення технології виготовлення, робота з безпечними нерадіоактивними матеріалами.
	2. Зменшення витрат сировини	Загальне покращення параметрів приладів. Здешевлення вихідних матеріалів.
	4. Покращення партійного виробництва	Використання на ринку компаній масового виробництва СЕ

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент1	Конкурент2	Конкурент3			
1.	Економічність	11 у.о.	41 у.о.	2607 у.о.	329 у.о.			+
2.	Призначення	Використання пс-SiO _x в якості діелектричної плівки	Використання CeO ₂ в якості діелектричної плівки	Використання Lu ₂ O ₃ в якості діелектричної плівки)	Використання Sm ₂ O ₃ в якості діелектричної плівки		+	

3.	Надійнос-ті	Строк придатно-ті та зберігання, хімічна стабільність, масове використа-ння	Термін дії, гарантований результат, обширна область використа-ння,	Термін дії, точність утворюван-ої текстури.	Термін дії, стабільний результат.	+		
4.	Технологічні	Працює в умовах розчину, повинен зберігатися в спеціальній упаковці	Працює в умовах розчину, повинен зберігатися в спеціальній упаковці	Працює в умовах розчину, повинен зберігатися в спеціальній упаковці	Працює в умовах розчину, повинен зберігатися в спеціальній упаковці		+	
5.	Ергономічні	Хімікат зручний у використа-нні	Хімікат зручний у використа-нні	Хімікат зручний у використа-нні	Хімікат зручний у використа-нні		+	
6.	Органолептичні	-	-	-	-		+	
7.	Естетичні	Зручний та зрозуміла інструкція для приготування плівки	Зручний та зрозуміла інструкція для приготування плівки	Зручний та зрозуміла інструкція для приготування плівки	Зручний та зрозуміла інструкція для приготування плівки		+	
8.	Транспор-табельно-сті	Поставляється у спеціальних хім. захищ. упаковках	Поставляється у спеціальних хім. захищених упаковках	Поставляється у спеціальних хім. захищених упаковках	Поставляється у спеціальних хім. захищених упаковках		+	
9.	Екологіч-ності	-	-	-	-		+	
10.	Безпеки	Безпечно	Безпечно	Безпечно	Безпечно		+	

Конкурент 1: Плівка на основі оксиду лутецію.

Конкурент 2: Плівка на основі оксиду церію.

Конкурент 3: Плівка на основі оксиду самарію.

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Виробництво тонких плівок на основі нанокремнію	Хімічна реакція у розчинах (NH ₃ , HCl, HF)	Наявна, але є потенціал для покращення.	Доступна, але потрібно більше часу для реалізації та покращення
		Текстурування з допомогою нанесення масок	Наявне, дає змогу покращувати симетрію, більш затратне в часі та коштах	Доступна, але немає достатнього виробничого досвіду
		Сухе хімічне текстурування	Наявне потребує використання установок, додаткових затрат на матеріали	Доступна, є досвід застосування
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Хімічна реакція у розчинах (NH ₃ , HCl, HF)				

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	1380
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Робота з хімічним обладнанням
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	300

Ринок є привабливим для входження.

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Необхідність простої технології виготовлення, відсутність токсичних та радіоактивних елементів в технологічному процесі, можливість низькотемпературного синтезу, а також сумісність з інтегральною технологією виготовлення мікросхем	Державні установи мікро-електронних виробів, приватні підприємства.	Поведінку клієнта формує ринок МЕ та витрати на матеріали для їх синтезу, особливості купівлі та експлуатації товару полягають у техніці безпеки та продажу суб'єктам промислової діяльності.	Товар має з високою діелектричною проникністю має, бути повністю придатним для партійного застосування. Компанія постачальник має надати документ по експлуатації товару, а також виконувати технічну підтримку по необхідності.

Таблиця 5.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Наявність кваліфікованих кадрів	Продукт є наукоємким тому потрібні люди з певними навичками та використанням хім. захисту	Пошук персоналу у науково-дослідних інститутах та організаціях
2.	Потреба в ресурсах	Для створення продукту потрібне хіміко-технічне забезпечення та певні	Укладання договорів з державними структурами для фінансування та надання можливостей для

		умови для тестування використання	тестування продукту
--	--	--------------------------------------	---------------------

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Спонукає розробляти і виробляти нові продукти, знижувати витрати їх виробництва і вартість, розширення області покращення МЕ	Використання з іншими продуктами даної області та ускладнення функціональної наповненості товару
2.	Попит	Існування стійкого попиту означає, що більшість клієнтів зацікавлені у введенні інновацій у сфері ФВ	Рекламна діяльність, просування товару у інтернеті

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції олігополія, нецінова	На ринку присутня невелика кількість фірм, які займаються виробництвом даної плівки, але у кожної є свої відмінності у дії продукту та його характеристикам	Підвищувати якість товару за рахунок використання передових розробок і досліджень хім. реакцій з кремнієвим матеріалом та залучення кваліфікованого персоналу
2. За рівнем конкурентної боротьби інтернаціональний	Місцезнаходження фірм не обмежується територіально; лабораторії та офіси розміщено у різних країнах в залежності від поставок	Створювати веб-сайт компанії, укладати договори поставок хім. реагентів більш дешевших виробників
3. За галузевою ознакою внутрішньогалузева	Економічна боротьба між різними товаровиробниками, які діють в одній галузі економіки, виробляють і реалізують однакові товари,	Слідкувати за продуктами конкурентів

	що задовольняють одну й ту саму потребу, але мають відмінності у виробничих затратах, якості, ціні, тощо.	
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращувати якість товару
5. За характером конкурентних переваг - цінова	Передбачає продаж продукції за більш низькими цінами, ніж конкуренти.	Продавати товар за низькою ціною.
6. За інтенсивністю - марочна	Боротьба носить явно виражений марочний характер, велике значення набуває брендинг	Реклама товару, створення символіки продукту

Таблиця 5.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	“Harrison”, “NanoShield Enterprise”,	Немає	Товар продається безпосередньо розробниками	Вимоги до якості (відсоток розпізнавання 99)	Замінників немає
Висновки:	Інтенсивність досить висока, бо продукт є наукоємним і тому не кожна фірма здатна розробити такий продукт	Немає	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Товар має бути якісним та дешевим	Обмежень немає

Для того, щоб бути конкурентоспроможним на ринку для розробки товару потрібно залучати висококваліфікованих спеціалістів у галузі науки та програмування.

Таблиця 5.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
-------	-------------------------------	---

1.	Ступінь задоволення потреб користувача.	Продукт має мати інтуїтивно зрозумілу інструкцію для використання та утилізації, щоб персонал міг без зайвих зусиль та загроз використовувати хімікати.
2.	Якість розробки з точки зору оптимальності показників надійності	Продукт має видавати стабільно високе значення діелектричної проникності при різних використаних травниках та на певному температурному проміжку реакції.
3.	Наявність наукових ресурсів	Для створення високоякісної плівки потрібні науковці, які здатні технічно грамотно поставити задачу, описати хіміко-фізично процеси та моделювати процес.
4.	Економічний (ціна товару)	Ціна товару не має бути занадто висока, щоб знайти потенційних покупців та сформувати імідж фірми.

Таблиця 5.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з “Harrison”						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Ступінь задоволення потреб користувача.	15						+	
2.	Якість розробки з точки зору оптимальності показників надійності	14					+		
3.	Наявність наукових ресурсів	17				+			
4.	Економічний (ціна товару)	20	+						

Таблиця 5.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: економічна (ціна товару).	Слабкі сторони: ступінь задоволення потреб користувача, якість розробки з точки зору оптимальності показників діелектричної проникності.
Можливості: знижувати витрати на виробництво продукції, покращувати якість продукту; формування попиту у користувачів за рахунок рекламної діяльності.	Загрози: потрібно знайти людей з певними навичками і знаннями і запропонувати вигідні умови для співпраці до того як це зроблять конкуренти; технічне забезпечення та певні умови для тестування працездатності продукту.

Таблиця 5.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Дослідження поведінки споживачів, пошук наукових ресурсів, розробка програмного забезпечення, створення реклами, взаємодія з органами інтернаціонального менеджменту та ринку збуту для перевірки працездатності хімічного реагенту	85 %	2 роки
2.	Дослідження поведінки споживачів, пошук інвесторів, пошук наукових ресурсів, створення лабораторного обладнання та його закупівля, тестування	75%	3 роки

Обрано альтернативу № 1.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 5.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Державні фабрики, світові компанії з виробництва ФЕП	Готові	Високий	Висока	Середня
2.	Приватні підприємства	Готові	Високий	Середня	Середня

Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №1 та №2.

Таблиця 5.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1.	1	За рахунок великих можливостей по об'ємах збуту товарів (портфеля укладених контрактів на постачання) і продуктивності підприємство може добитися менших витрат	Витрати на виробництво та закупівлю продуктів	Стратегія лідерства на витратах
2.	2	Надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Така відмінність може базуватися на об'єктивних або суб'єктивних, відчутних і невідчутних властивостях товару бути реальною або уявною.	Формування попиту у користувачів за рахунок спеціальної вузько-запатентованої функціональності та високої якості товару	Стратегія диференціації

Обрано стратегію лідерства на витратах.

Таблиця 5.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопроходцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1.	Ні	Так		Наслідування лідера

Таблиця 5.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні і позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Відсоток відтворюваності у партійному виробництві 99, високий відсоток при роботі з різними типами кремнію	Лідерства на витратах.	Низька ціна, проста та інтуїтивно зрозумілий інструкція використання, базовий результат та можливість пристосування продукту у цілях компанії покупця.	Оптимальне співвідношення ціна/якість, співпраця.

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 5.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Високий відсоток відтворюваності	Простота технологічного	Інтуїтивно зрозуміла інструкція використання та утилізації, висока

	отримання якісної (однорідність/висота) текстури кремнієвих поверхні	процесу, відсутність радіоактивних матеріалів, сумісність з інтегральною системою виробництва	швидкодія
2.	Надійність	Використання хімікатів довгого часу зберігання	Стабільність процесу при зміні та коливаннях температури та складових розчину травлення

Таблиця 5.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Діелектрична плівка на основі нанокремнію		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Функціонування у розчинах з наявністю (NH ₃ ,HCl, HF)	М	
	2. Низька ціна 11 у.о.		
	3. Використання алгоритмів корекції результату.	М М	
	4. Хімікат зручний у використанні не потребує додаткових процедур окрім розчинення.	М	
	5. Безпечно для використання але при дотриманні умов техніки безпеки для хім. матеріалів	М М	
		М	
	Якість: відсоток відворюваності високоякісної текстури 99		
	Пакування: контейнери		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: гарантія, надання кредиту.		
	Після продажу: доставка, обслуговування, утилізація.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: закодований програмний ключ, захист інтелектуальної власності.			

Таблиця 5.20 – Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін	Рівень цін	Рівень доходів	Верхня та нижня межі
---	------------	------------	----------------	----------------------

п/п	на товари-замінники	на товари-аналоги	цільової групи споживачів	встановлення ціни на товар/послугу
	-	50 – 2600 у.о.	20000 у.о. і вище	20 – 50 у.о.

Таблиця 5.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Замовлення товару на сайті або безпосередньо у розробників	Встановлення контакту, інформування, поділ, зберігання, сортування	Канал нульового рівня	Виробник безпосередньо збуває продукцію покупцям

Таблиця 5.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Використання товару у масових виробничих процесах	Прямі - канал комунікації, коли інформація передається безпосередньо від інформатора до інформованої особи	Низька ціна, проста та зрозуміла інструкція використання. утилізація не спричиняє летальної загрози для людського організму	Поширення знань про підприємство, підтримання позитивних емоцій у осіб, що придбали товар, поширення відомостей про сервіс, демонстрація солідарності підприємств, безумовного виконання взятих на себе зобов'язань; інформація про випробування	Звернення засноване на відмінностях між рекламованим товаром і тим, що пропонують конкуренти. Звернення ґрунтується на тому чи іншому мотиваційному підході, покликаною впливати на споживчі переваги покупців - наприклад, функціональну

				товару і поліпшення його задля споживачів.	перевагу, задоволення, імідж, захоплення і альтруїзм.
--	--	--	--	---	---

ВИСНОВКИ

В даній роботі було здійснено літературний огляд різних видів напівпровідникових структур та методів оцінки якості межі поділу в них, а також досліджено електрофізичні та фоточутливі властивості варікапів на основі структури nc-SiO_x/c-Si в залежності від технологічних умов синтезу плівок нанокремнію.

Максимальні значення електрофізичних параметрів одержаних варікапів були наступними. Темновий коефіцієнт перекриття по ємності досягав 95, що на порядок перевищує аналогічний показник для варікапів на основі оксидів рідкоземельних матеріалів. Відносна діелектрична проникність плівки нанокремнію була одержана на рівні 7, що є дещо менше, ніж для плівок оксидів рідкісноземельних металів. Величина вбудованого в плівку нанокремнію заряду лежала в околі 10^{-4} Кл/м², а сумарна густина поверхневих станів структури досягала $2 \cdot 10^{-11}$ см⁻², що приблизно на порядок нижче, ніж для аналогічних систем.

Максимальні показники фоточутливості одержаних варікапів були наступними: світловий коефіцієнт перекриття по ємності 60-80, відносна зміна ємності при зростанні рівня світлового сигналу в 6-7 разів, що на порядок перевищує аналогічні показники для фотоварікапів на основі оксидів рідкоземельних матеріалів.

Для синтезу фотоварікапів на основі плівок нанокремнію з максимальною чутливістю до світла слід обрати наступні технологічні режими: температура осадження 200 °С, час осадження 10 хв, тип підкладки КЕФ-4,5.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. V. Koval, O. Bogdan, Y. Yakymenko. Study of nanocrystalline silicon thin films for application in solar cells // 4-th International Conference Nanocon-2012. Proceedings of the Nanocon-2012, 23–25th October, 2012. – Brno, Czech Republic. – p.138.
2. Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – Москва: Высш. шк., 1987. – 479 с.
3. Гуртов В. А. "Твердотельная электроника": учеб. пособие / В. А. Гуртов. – Петрозаводск, 2008. – 511 с.
4. Тугов Н. М. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов / Н. М. Тугов, Б. А. Глебов. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
5. Диод Шоттки на основе GaAs: Технология получения и диагностика: электронное учебно-методическое пособие / М. В. Дорохин, А. В. Здоровещев. – Нижний Новгород: НГУ им. Н.И. Лобачевского, 2013. – 75 с.
6. Поклонский Н. А. Физика электрического контакта металл/полупроводник: учебное пособие по спецпрактикуму «Физика полупроводниковых приборов» / Н. А. Поклонский, Н. И. Горбачук, Н. М. Лапчук. – Мн.: БГУ, 2003. – 52 с.
7. Борисов О. В. Основи твердотільної електроніки: навч. посіб. / О. В. Борисов; за ред. Ю. І. Якименка. – К.: Освіта України, 2011. – 462 с.
8. Колпаков В. А. Исследование вольт-амперной характеристики диода Шоттки / В. А. Колпаков, А. И. Колпаков, С. В. Кричевский. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. – 24 с.
9. Шиляев П. А. Полупроводниковые гетероструктуры: гетеропереход: учебно-методическое пособие / П. А. Шиляев, Д. А. Павлов. – Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2009. – 18 с.
10. Шарма П. А. Полупроводниковые гетероструктуры / П. А. Шарма, Р. К. Пурохит. – М.: Сов. Радио, 1979. – 232 с.
11. Трофимов П. В. Использование полупроводниковых гетероструктур в электронике / П. В. Трофимов, Ю. И. Подьячий. – Харьков, 2015. – 4 с.

12. Милнс А. Гетеропереходы и переходы метал – полупроводник / А. Милнс, Д. Фойхт. – Москва: Мир, 1975. – 431 с.
13. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов / С. М. Зи. – Москва: Энергия, 1973. – 656 с.
14. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника / Ю. Р. Носов. – М.: Радио и связь, 1989. – 360 с.
15. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання / В. О. Чадюк. – Київ: НТУУ "КПІ", 2012. – 433 с.
16. Структуры металл-диэлектрик-полупроводник [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.ie.tusur.ru/books/TTE/xml/2.13.xml>.
17. Рожков В. А. Электрофизические свойства структур металл-оксид диспрозия – оксид гадолиния – кремний / В. А. Рожков, М. А. Родионов // Письма в ЖТФ – 2004. – Т. 30, вып.12. – С. 16 – 20.
18. Рожков В.А. МДП варикапы и фотоварикапы на основе структуры $\text{Al-Sm}_2\text{O}_3\text{-Si}$ / В.А. Рожков, А.Ю. Трусова, И.Г. Бережной, В.П. Гончаров // Письма в ЖТФ – 1995. – Т. 65, вып. 8. – С. 183 – 186.
19. Королевич Л.Н. CV-исследования электрофизических параметров тонких пленок CeO_2 в МДП-структуре $\text{Al-CeO}_2\text{-n-Si-Al}$ / Л. Н. Королевич, А. В. Борисов // Электроника и связь – 2008. – Т. 42, вып. 1. – С. 35 – 38.
20. Рожков В.А. Кремниевые метал-диэлектрик-полупроводник варикапы с диэлектриком из оксида иттербия / В.А. Рожков, А.Ю. Трусова. // Письма в ЖТФ – 1997. – Т. 23, вып. 12. – С. 50 – 55.
- 21 Загоруйко Ю. А. Спектрально-чувствительные МОП-фотоварикапы на основе кристаллов CdZnTe и CdS / Ю. А. Загоруйко, В.А. Христьян, П.В. Матейченко // Письма в ЖТФ – 2010. – Т. 36, вып. 4. – С. 12 – 17.
22. Рожков В.А. МДП варикапы и фотоварикапы на основе структуры $\text{Al-Lu}_2\text{O}_3\text{-Si}$ / В.А. Рожков, В.П. Гончаров, А.Ю. Трусова // Письма в ЖТФ – 1995. – Т. 21, вып. 2 – С. 6 – 10.
23. Сокольников А. В. МДП-структуры: учеб.пособие / А. В. Сокольников, Е.Г. Тюрин. – Саранск: Изд. Мордов. ун-та, 1986. – 63 с.

24. Федотов Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов / Я. А. Федотов, И. М. Волкова. – Москва: Советское радио, 1969. – 592 с.
25. МДП-фототранзисторы [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://studbooks.net/854550/tehnika/fototranzistory>.
26. Волкова Е.В. Введение в физику полупроводниковых диодов и методы проектирования с использованием высокопроизводительных вычислений: Учебное пособие. / Е.В. Волкова, А.С. Пузанов, С.В. Оболенский – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 60 с.
27. Кармазинский А. Н. Синтез принципиальных схем цифровых элементов на МДП-транзисторах / А. Н. Кармазинский. – М.: Радио и связь, 1983. – 256 с.
28. Дефекты в твердых телах и их влияние на свойства функциональных материалов: электронное учебно-методическое пособие / М. В. Дорохин, А. В. Здоровещев. – Нижний Новгород: НГУ им. Н.И. Лобачевского, 2012. – 65 с.
29. Гуртов В.А. Твердотельная электроника / В.А. Гуртов – Москва, 2005. – 511 с.
30. Зуев В.А. Неравновесные приповерхностные процессы в полупроводниках и полупроводниковых приборах / В.А. Зуев, А.В. Саченко, К.Б. Толпыго. – М.: Советское радио, 1977. – 256 с.
31. Коваль В. М., Шмирева О. М. Дослідження властивостей межі поділу Si морфологічних структур // Електроніка і зв'язь. – 2007. – №3. – С. 5 – 12.
32. Chowdhury Amartya Fabrication of low density nanocrystalline silicon absorber layer and its application in thin-film solar cell / Amartya Chowdhury, Sumita Mukhopadhyay, Swati Ray // Thin Solid Films. – 2007. – vol. 516, 2007, – P. 6858 – 6862.
33. Veschetti Y. Optimisation of amorphous and polymorphous thin silicon layers for the formation of the front-side of heterojunctions solar cells on p-type crystalline silicon substrates / Y. Veschetti, J.-C. Muller, J. Damon-Lacoste, P. Roca I Cabarrocas, A.S. Gudovskish, J.-P. Ribeyron, E. Rolland // Thin Solid Films. – 2006. – vol. 511, Jan. 2006, – P. 543 – 547.

34. Ribeyron P.-J. Polymorphous/crystalline heterojunction solar cells with low cost industrial process on p type monocrystalline silicon / P.-J. Ribeyron, Y. Veschetti, J.-C. Muller, J. Damon-Lacoste, P. Roca I Cabarrocas, A.S. Gudovskish, J.-P. Kleider // 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6-10 June 2005, Barcelona, Spain.